



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**VÝVOJ OPTIMÁLNÍ GEOMETRIE CHLADÍCÍCH KANÁLŮ
PRO DÍLY VYROBENÉ 3D TISKEM ZE SLITINY MĚDI**

DEVELOPMENT OF OPTIMAL GEOMETRY OF COOLING CHANNELS FOR 3D PRINTED COMPONENTS
MADE FROM COPPER ALLOYS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Lázníčka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Martin Láznicka**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vývoj optimální geometrie chladících kanálů pro díly vyrobené 3D tiskem ze slitiny mědi

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Chlazení forem při výrobě plastových dílů vstřikováním je důležitým parametrem pro efektivitu a ekonomičnost výroby. V případě chladících vložek se složitou geometrií je výhodné umístit kanály těsně pod povrch a zajistit tak maximální efektivitu chlazení. Tvar, rozměry a úhly navržených vnitřních kanálů však musí být vhodně nastaveny, aby byla zajištěna jejich průchodnost a vyrobitelnost pomocí aditivní technologie selective laser melting.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je stanovit vhodné tvary a rozměry chladících kanálů pro výrobu chladících vložek pomocí technologie Selective Laser Melting ze slitiny mědi.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- identifikovat návrhové postupy a doporučení pro výrobu chladících kanálů ze standardních materiálů,
- navrhnout experimentální tělesa, metody testování a vyhodnocení,
- experimentálně stanovit optimální rozměry, tvar a úhel stoupání chladících kanálů,
- ověřit vhodnost parametrů výrobou prototypového dílu.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva, fotografická dokumentace, laboratorní protokol, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

SAIFULLAH, A.B.M., S.H. MASOOD, M. NIKZAD a M. BRANDT. An Investigation on Fabrication of Conformal Cooling Channel with Direct Metal Deposition for Injection Moulding. In: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering [online]. 2016. ISBN 9780128035818. Získáno z: doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.04023-6

BROOKS, H. a K. BRIGDEN. Design of conformal cooling layers with self-supporting lattices for additively manufactured tooling. Additive Manufacturing [online]. 2016, roč. 11, s. 16–22. ISSN 22148604. Získáno z: doi:10.1016/j.addma.2016.03.004

ORDÁS, N., L. C. ARDILA, I. ITURRIZA, F. GARCIA, P. ÁLVAREZ a C. GARCÍA-ROSALES. Fabrication of TBMs cooling structures demonstrators using additive manufacturing (AM) technology and HIP. Fusion Engineering and Design [online]. 2015, roč. 96, s. 142–148. ISSN 0920-3796. Získáno z: doi:10.1016/j.fusengdes.2015.05.059

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce bylo provést identifikaci postupů při návrhu chladících kanálů ze standardních materiálů. Dále experimentálně stanovit rozměry kanálů vyrobených technologií SLM pro konformní chlazení a optimalizovat jejich geometrii.

KLÍČOVÁ SLOVA

Chlazení vstřikovacích forem, konformní chlazení, technologie SLM, geometrie kanálů

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis was to identify processes for the design of cooling channels with standard materials. Furthermore, experimentally determine the dimensions of the SLM slots for conformational cooling and optimize their geometry.

KEYWORDS

Cooling injection moulds, conformal cooling, SLM technology, channel geometry

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Lázníčka, M. Vývoj optimální geometrie chladících kanálů pro díly vyrobené 3D tiskem ze slitiny mědi. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 46 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Daniela Koutného, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. května 2017

.....

Martin Láznička

PODĚKOVÁNÍ

Na úvod bakalářské práce bych rád poděkoval svému vedoucímu doc. Ing. Danielu Koutnému, Ph.D. za cenné rady. Déle bych chtěl poděkovat Ing. Radku Vránovy za rady poskytnuté při vyhodnocování zkušebních vzorků.

OBSAH

Úvod	10
1 Technologie vstřikování plastů	11
1.1 Vstřikovací lis	11
1.1.1 Popis funkce vstřikovacího lisu	11
1.2 Forma	12
1.3 Hlavní části formy	12
1.3.1 Vtoková soustava	12
1.3.2 Tvarová dutina formy	12
1.3.3 Vyhazovací systém	13
1.3.4 Temperační systém	13
1.4 Způsoby výroby	14
1.5 Uspořádání temperačního okruhu	14
1.6 Rozmístění temperačních kanálů kolem tvarové dutiny formy	14
1.7 Prvky používané pro sestavování okruhů	15
1.8 Chlazení dlouhých tvárnků a obtížně dostupných míst	15
1.9 Vliv jakosti povrchu na přestup tepla	16
1.10 Elektrická topná tělesa	16
1.11 Vložky z dobře tepelně vodivých materiálů	17
1.12 Využití speciálních materiálů	17
2 Výroba konformního chlazení	18
2.1 Technologie slm	19
2.1.1 Aplikace Selective Laser Melting	19
2.2 Omezení technologie slm	20
2.2.1 Podpory	20
2.3 Výstavba převíslých ploch	21
2.3.1 Propady nataveného materiálu	22
2.3.2 Deformace převíslých částí	22
2.4 Výzkumy v oblasti výstavby převíslých ploch technologií slm	23
3 Analýza problému a cíle práce	29
4 příprava experimentálních vzorků	30
4.1 Vzorek č. 1	30
4.2 Vzorek č. 2	31
4.3 Vzorek č. 3	31
4.4 Příprava dat pro tisk	32
4.5 popis zařízení	32

5	Průběh výstavby a dosažené výsledky.....	33
5.1	Poruchy během výstavby	33
5.2	Kontrola průměru experimentálního tělesa č. 1	34
5.3	Analýza průměru kanálu v závislosti na úhlu sklonu	36
5.4	Analýza vývinu vad na proměnlivém úhlu stoupání.....	38
6	Diskuze	40
	Závěr.....	41
	Seznam použitých zkratk	45
	Seznam příloh.....	46

ÚVOD

Technologie vstřikování plastů se začala rozvíjet již koncem 19. století s příchodem plastických hmot a potřeby jejich zpracování. Plastové výrobky měly oproti dříve používaným materiálům mnoho výhod, a proto docházelo v průběhu 20. století k velkému rozmachu této technologie. V dnešní době máme širokou škálu plastů s nejrůznějšími vlastnostmi, setkáváme se s nimi v mnoha aplikacích, ve kterých mají svoje nezastupitelné místo. Vzhledem k velké rozmanitosti plastů můžeme nalézt použití plastových součástí v mnoha oblastech. Nejčastěji se setkáváme s plastovými výrobky ve spotřebním průmyslu, ve kterém jsou kladeny nároky na levnou výrobu a estetické vlastnosti. S příchodem kvalitnějších materiálů je možné použít plast i při výrobě strojních součástí. Nejrozšířenější technologií při zpracování plastů je vstřikování, které přináší relativně levný a rychlý způsob výroby ve velkých sériích. Při výrobě jsou často kladeny vysoké nároky na výslednou kvalitu dílů, proto je nutné použití kvalitních nástrojů splňující vysoké požadavky.

Celý cyklus výroby se sestává z několika částí. Jedním z nejdéle trvajících úseků je ochlazování roztaveného materiálu v dutině formy. Z toho důvodu je snaha tento čas zkrátit účinným chlazením pomocí kvalitně provedených temperačních kanálů. Správné provedení kanálu má také významný vliv na výslednou kvalitu součástí. Ačkoliv lze konvenčními technologiemi dosáhnout uspokojivých vlastností, s příchodem nových technologií se otevírá prostor pro jejich využití a dosažení lepších výsledků.

V těchto oblastech se tak můžeme setkat s aplikací technologie 3D tisku. Využitím této technologie je možné vytvořit temperační kanály, které nejsou běžnými způsoby vyrobitelné a docílit tak lepších vlastností temperačního systému, tento druh chladicího systému nazýváme konformní chlazení. Před využitím těchto metod je třeba pečlivé přípravy neboť se jedná o značně nákladnou záležitost. Při vhodném návrhu můžeme dosáhnout výrazného zlepšení kvality výrobku a snížení výrobních časů.

1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ

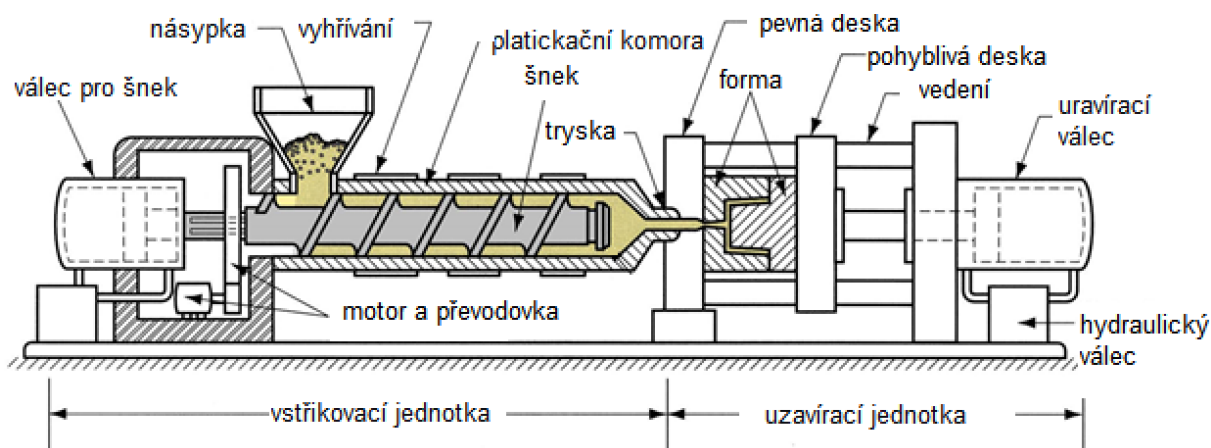
Vstřikování je tvářecí proces, při kterém je tvarová dutina formy vyplňována taveninou. Jedná se o proces zahrnující řadu jednotlivých úkonů opakující se v průběhu jednoho výrobního cyklu. Tato technologie poskytuje velmi efektivní výrobu plastových dílů v řádů jednotek až desítek sekund. Ačkoliv vstřikování dílu trvá krátkou dobu, předchází jí velmi náročná a nákladná příprava nástroje. [3]

1.1 VSTŘIKOVACÍ LIS

Vystřikovací lis je tvářecí stroj, jehož funkcí je dopravit materiál do dutiny formy při specifických parametrech. Lis se sestává ze dvou hlavních částí, vstřikovací jednotky a uzavírací jednotky. Moderní lisy jsou vybaveny řídicím systémem, kterým je možno ovládat jednotlivé části v průběhu vstřikovacího cyklu a zajistit tak plnou automatizaci výrobního procesu. [1]

1.1.1 POPIS FUNKCE VSTŘIKOVACÍHO LISU

Plastový granulát je dopravován ze zásobníku do násypky, odkud propadává do šneku. Rotačním pohybem šneku je granulát posouván směrem k formě. V průběhu přepravy se granulát natavuje dvěma způsoby. Část tepla je vyvozena vnitřním třením granulátu a třením o stěny tavicí komory, zbytek tepla je dodáváno přídavným vytápěním vstřikovací jednotky. Po dokonalém natavení granulátu je translačním pohybem šneku natlačeno do formy přesné množství plastu. Plast musí být co možná nejrychleji dopraven do všech míst tvarové dutiny. Ve chvíli, kdy se dostane tavenina do kontaktu s formou, začíná její ochlazování a je nutné, aby bylo zajištěno úplné vyplnění celé dutiny. V této fázi již začíná tuhnutí taveniny, je však nutné kompenzovat její teplotní smrštění a tak je plast neustále do formy tlačěn jedná se o tzv. fázi dotlaku. Po úplném zatuhnutí dochází k otevření formy a vyjmutí výrobku. Součástí vstřikovacího lisu také bývá dopravní nebo manipulační zařízení, které zjednodušuje obsluhu lisu. [3]

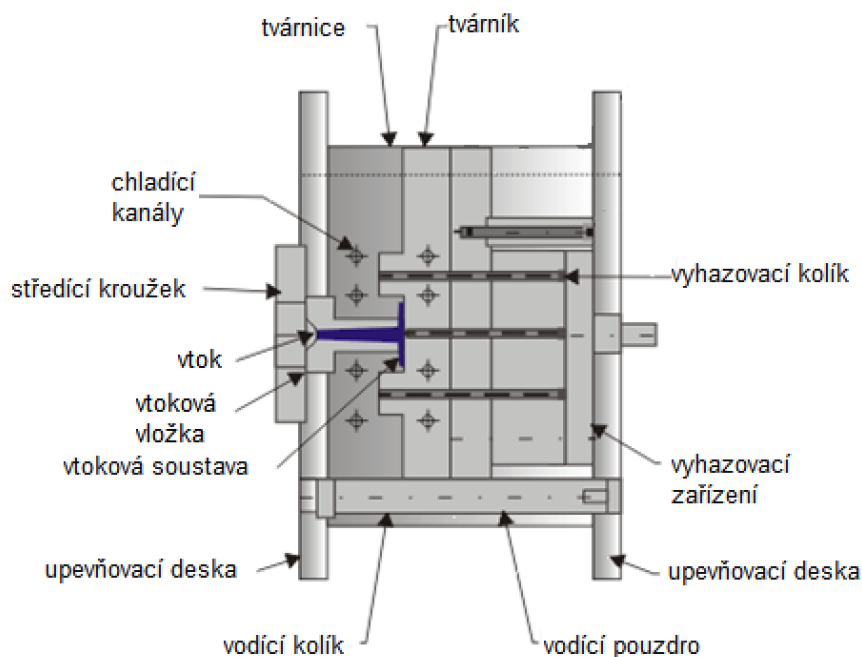


Obrázek 1 Uspořádání vstřikovacího stroje (upraveno) [2]

1.2 FORMA

Vstřikovací forma je nástroj, který musí splnit mnoho nároků vycházejících z technologie vstřikování. Hlavní funkcí formy je vhodné vytvarování plastické hmoty do požadovaného tvaru. Další důležitou funkcí je odvod tepla z taveniny a zajistit tak zatuhnutí výsledného dílce. Forma se skládá z mnoha jednotlivých částí, které mají zajistit správnou funkci v jednotlivých částech výrobního cyklu. Nástroj se obvykle konstruuje pro vysoký počet vyráběných dílů a tak je nutné použít kvalitní materiály, odolávající vysokému počtu pracovních cyklů, bez nutnosti výměny funkčních částí formy. [4]

1.3 HLAVNÍ ČÁSTI FORMY



Obrázek 2 typické uspořádání vstřikovacího nástroje (upraveno) [5]

1.3.1 VTOKOVÁ SOUSTAVA

Vtokové kanály mají za úkol dopravit taveninu do dutiny formy, musí umožnit průtok požadovaného množství taveniny v co nejkratším čase a s minimálními tlakovými ztrátami. Rozmístění vtokových kanálů závisí na uspořádání formy a její násobnosti. Dopravovaný plast nesmí při průchodu kanály začít tuhnout, z toho důvodu bývá vtoková soustava vyhřívaná. Při konstrukci násobné formy je požadováno, aby byly jednotlivé dutiny vyplňovány současně a to taveninou o stejných parametrech (teplota, tlak, rychlost). [6]

1.3.2 TVAROVÁ DUTINA FORMY

Tvar dutiny formy je negativem tvaru součásti. Tato dutina je tvořena mezi dvěma částmi formy tvárnicí a tvárníkem. Tyto části přicházejí do styku s nataveným materiálem, a podílí se na výsledné kvalitě povrchu. Často bývají kladeny vysoké nároky na vzhled lisovaných součástí a tak musí mít pohledové plochy kvalitní povrchovou úpravu. Dělicí rovina se obvykle volí kolmo na směr uzavírání, avšak v některých případech může mít forma i velmi komplikovaný tvar nebo i více dělicích rovin. Při návrhu tvarové dutiny se musí počítat s tepelným smrštěním materiálu, které je u plastických hmot výrazné. Další požadavkem je spolehlivé vyjmutí

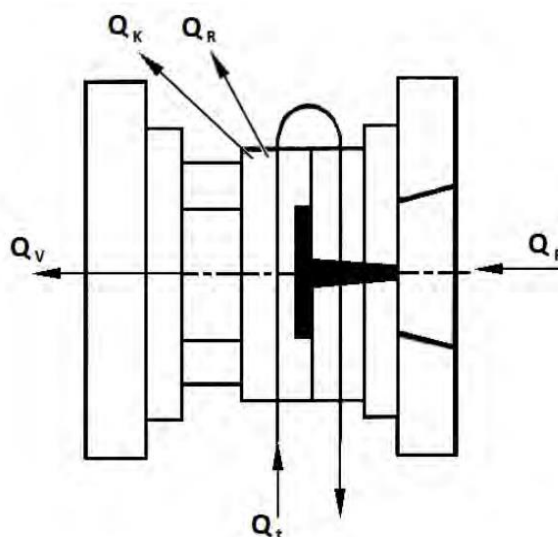
výrobku z formy, proto jsou některé tvary opatřeny úkosy pro bezproblémové vyjmutí vylisku. [6]

1.3.3 VYHAZOVACÍ SYSTÉM

Po ztuhnutí taveniny v dutině formy a jejím otevření je nutné vyjmout vylisek z formy. Ve většině případů je požadováno, aby díl zůstal na pohyblivé straně formy, ve které je umístěno vyhazovací zařízení. Provedení vyhazovacího systému může být více způsobů. Mezi nejpoužívanější patří použití vyhazovacích kolíků, které jsou při vyhazování v přímém kontaktu. Při použití tohoto systému je nutné, aby byly vyhazovací kolíky umístěny na vhodném místě, neboť dojde k vytvoření otlaků. Mezi šetrnější způsoby patří vyhazování stírací deskou, která se opírá o povrch součásti na větší ploše a nezpůsobuje tak viditelné otlaky na povrchu. Dalším možným způsobem je vyhazování pomocí stlačeného vzduchu. Za vylisek a formu je přiveden vzduch, který oddělí vylisek od formy. Tento způsob se používá zejména u vylisků s velkou plochou, protože nezpůsobuje deformaci součásti. [7]

1.3.4 TEMPERAČNÍ SYSTÉM

Temperace vstřikovacích forem zajišťuje optimální teplotní podmínky při vstřikování plastů v jednotlivých částech výrobního cyklu. Je snaha o co nejrovnoměrnější rozložení teploty po celém povrchu tvarové dutiny. V případě, že by nebylo dodrženo rovnoměrné ochlazování, mohla by po vychladnutí vylisku vznikat pnutí, která by mohla způsobit poškození dílu. Ochlazování formy probíhá několika procesy, z nichž nejvýznamnější podíl má temperační systém, kterým proudí chladicí médium. K ochlazování média často dochází v externím zařízení, které je většinou společné pro několik vstřikovacích lisů. Doba a kvalita chladnutí je závislá na vhodném uspořádání kanálů, použitém materiálu. Vhodnou konstrukcí je možné výrazně zkrátit dobu cyklu a výrazně tak snížit výrobní náklady. [8]



Obrázek 3 Teplená bilance formy

Q_p - teplo přivedené taveninou, Q_t - teplo odvedené temperací, Q_k - teplo odvedené do okolí, Q_R - teplo odvedené zářením, Q_v - teplo odvedené do upínacích ploch stroje [6]

Ochlazování taveniny v dutině formy tvoří podstatnou část výrobního cyklu. Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2.4. Hlavním mechanismem ochlazování je přenos tepla do temperačního média. Nejdůležitějším faktorem ovlivňující tento proces je uspořádání chladicích kanálů

kolem dutiny formy. V ideálním případě by měly kanály kopírovat povrch dutiny, aby byl zajištěn efektivní přenos tepla, často se však jedná o velmi komplikované tvary, které by nebylo možné dosáhnout konvenčními technologiemi. Z toho plyne značná náročnost návrhu temperačních kanálů. Dalším požadavkem kladeným na kanály je, aby v co nejmenší míře snižovaly tuhost formy. Z těchto důvodů je tak důležité optimální rozmístění. Při rozvržení se tak používají zásady, které by měli i při těchto omezeních přinést dostačující výsledek. S příchodem moderních softwarů je možné, aby bylo navržené řešení analyzováno a iteračním způsobem prováděny změny v uspořádání kanálů. Může se předejít nefunkčním chladicím okruhům a snížit tak náklady, které by byly zapříčiněny výrobou nefunkční formy. [9],[10]

1.4 ZPŮSOBY VÝROBY

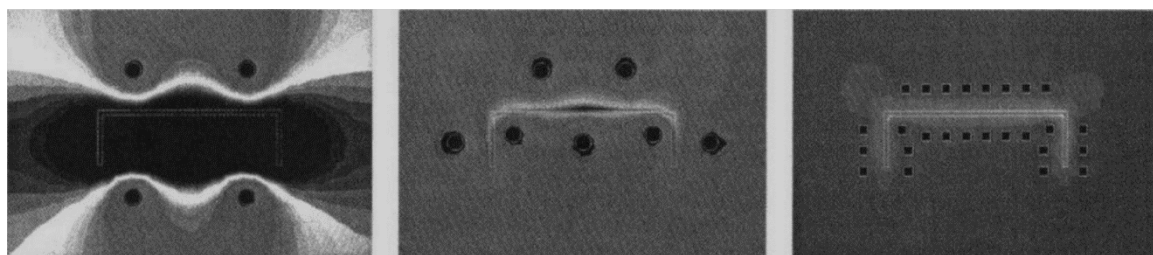
Způsob výroby je hlavním limitujícím faktorem. Většina kanálů je tvořena vrtanými kanály, které však mohou mít jen přímý směr, což značně omezuje výrobní možnosti. Dalším možným způsobem je frézování. Tímto způsobem můžeme dosáhnout složitějších tvarů, je však nutné utěsnit drážku od zbytku formy, nebo je možné vložení trubky a následným pájením natvrdo spojit součásti a zajistit dostatečný přenos tepla. [9],[10]

1.5 USPOŘÁDÁNÍ TEMPERAČNÍHO OKRUHU

Návrh temperačních kanálů by měl následovat ihned po rozvržení uspořádání formy, určení její násobnosti a umístění vtokové soustavy. Temperace může být řešena několika samostatnými okruhy přičemž platí, že místa, na které přivádíme médium, jsou chlazeny intenzivněji. Průchodem a následným ohříváním média se snižuje přestup tepla. Využitím tohoto principu můžeme do značné míry regulovat ochlazování na různých místech formy a docílit tím tak rovnoměrnějšího chlazení než za použití jednookruhového temperačního systému. [11]

1.6 ROZMÍSTĚNÍ TEMPERAČNÍCH KANÁLŮ KOLEM TVAROVÉ DUTINY FORMY

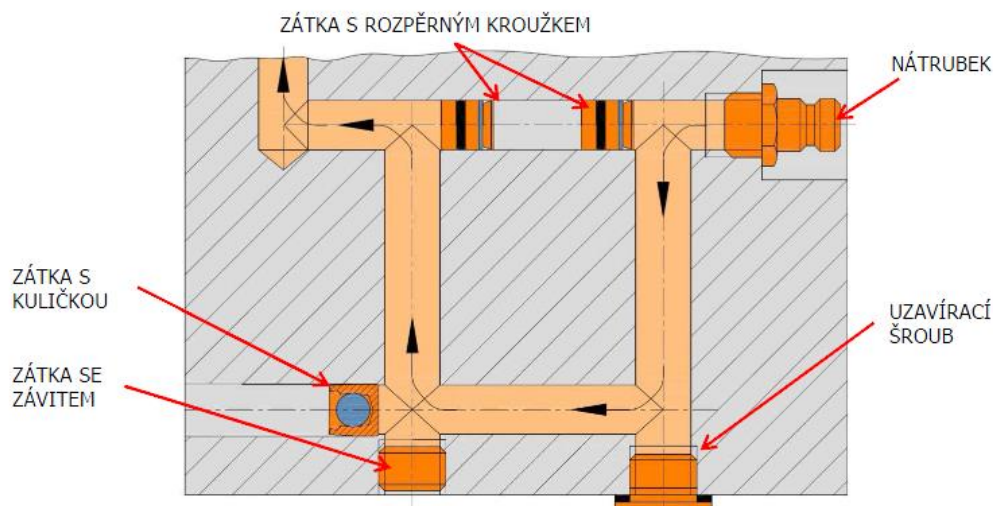
U výlisků s jednoduchou geometrií jsme schopni vytvořit kanály pouhým vrtáním. Pro tento způsob realizace se využívají zásady, jež přispějí k rovnoměrnější teplotě na povrchu tvarové dutiny formy. Obecně lze říci, že je vhodnější volit vyšší počet kanálků s nižším průměrem, dosáhne se tím rovnoměrnějšího odvodu tepla. Na Obr. 4 jsou dobře patrné rozdíly v rozložení teplotních polí u kanálů s různými průměry a uspořádáním kolem dutiny.[11],[12]



Obrázek 4 Teplotní pole při různých konfiguracích temperačních kanálů.[12]

1.7 PRVKY POUŽÍVANÉ PRO SESTAVOVÁNÍ OKRUHŮ

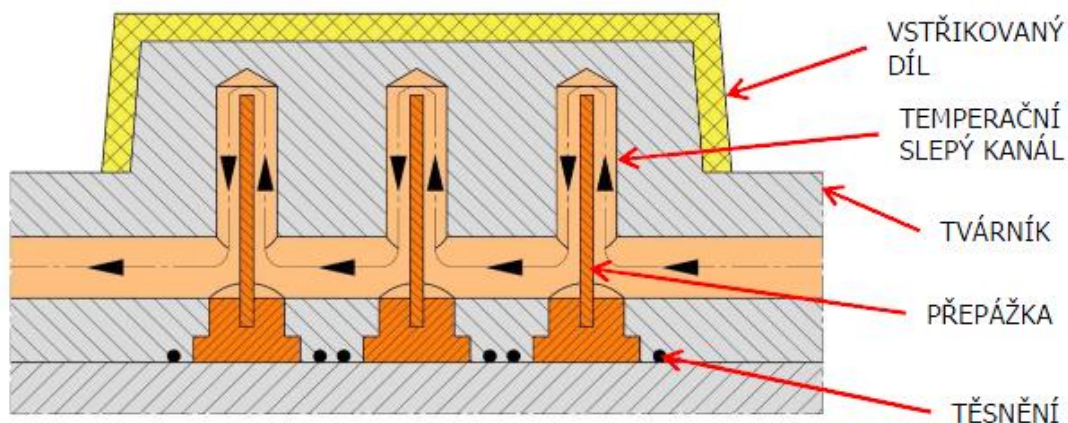
Při sestavování chladicích okruhů můžeme využít normalizovaných součástí, jakou jsou zátky, rozpěrné kroužky, nátrubky a další vybavení. Výrobou těchto součástí se například zabývá firma Hasco nebo Rehau. [11]



Obrázek 5 Ukázky využití normalizovaných součástí. [11]

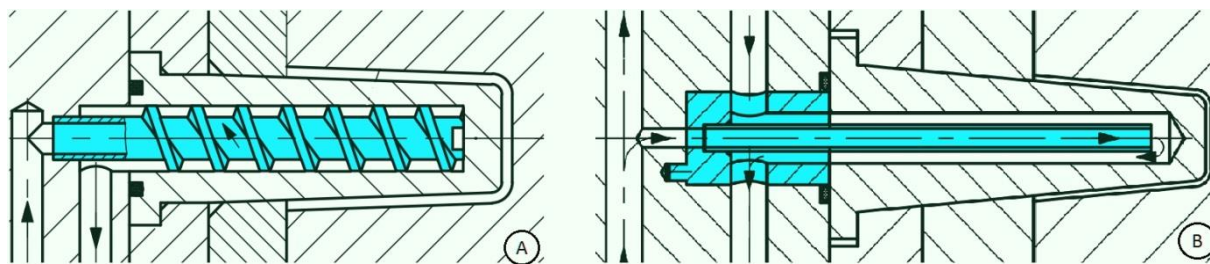
1.8 CHLAZENÍ DLOUHÝCH TVÁRNÍKŮ A OBTÍŽNĚ DOSTUPNÝCH MÍST

Chlazení těžko dostupných míst se musí věnovat vyšší pozornost, neboť vzniká riziko, že v těchto oblastech bude probíhat ochlazování pomaleji, může tak docházet k neúměrnému navyšování doby výrobního cyklu. K zajištění chlazení bylo vytvořeno řešení, jež spočívá ve vyvrtání slepého otvoru a vložení přepážky, kterou je nuceno médium obtéci a zajistit tak cirkulaci v těchto místech.[11]



Obrázek 6 Princip temperace za použití přepážky. [11]

Nevýhodou přepážek s jednoduchou rovinnou stejnou je nerovnoměrné chlazení. Strana, na níž kapalina vystupuje, je ochlazování intenzivnější, to může vest k vytvoření vnitřního prnutí u výlisku a po odformování k jeho deformaci. Možným řešením těchto nedostatků je použití tzv. fontánky nebo spirální jádra.[11]



Obrázek 7. a) spirální jádro b) fontána [15]

1.9 VLIV JAKOSTI POVRCHU NA PŘESTUP TEPLA

Sdílení tepla mezi stěnou a tekutinou označujeme jako konvekci. V jádru kapaliny dochází ke kombinaci přenosu tepla prouděním a vedením. Mezi stěnou a kapalinou se teplo přenáší pouze vedením. Konvekce je přirozený proces, při kterém se ohřívá vrstva kapaliny nebo plynu u stěny a vlivem změn hustoty samovolně stoupá vzhůru. Tento proces je možno urychlit a to zvýšením rychlosti média stěnu obtékající, v tomto případě je označována jako nucená konvekce. Lze rozlišovat tři druhy režimů, při kterých konvekce probíhá

- přirozená konvekce,
- laminární,
- nucená turbulentní.

V případě, že se jedná o laminární proudění, dochází k postupnému přestupu tepla mezi proudnicemi. Mnohem výhodnější je stav, kdy je vyvinuto turbulentní proudění zvyšuje se součinitel přestupu tepla a dochází k promísení jednotlivých proudnic a tím tak lepšímu distribuování tepla v proudu kanálu. Na vyvinutí turbulentního proudění má také vliv drsnost povrchu. Z toho důvodu se snažíme, aby byla u kanálů zvýšená drsnost na Ra12 a vyšší.[13],[14]

1.10 ELEKTRICKÁ TOPNÁ TĚLESA

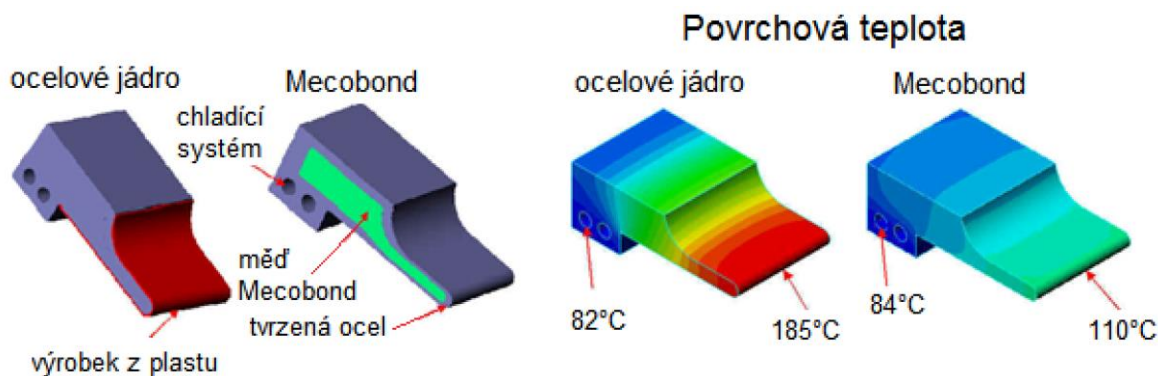
Při výrobě některých součástí může být vyžadováno vyhřívání tvarové dutiny. Hlavním důvodem vyhřívání je, aby bylo zajištěno úplné zatečení taveniny do všech částí formy při optimálních podmínkách. V těchto případech můžeme použít topná elektrická tělesa. Výhodami těchto prvků jsou kompaktní rozměry a dobrá regulace ohřívání. Nevýhodou je pak přenos tepla do formy. Při jednoduchém vložení by nedocházelo k přenosu tepla do formy a topné těleso by se přehřívalo. Z těchto důvodů je možné těleso do formy zalít hliníkem.[11]



Obrázek 8 topné těleso [16]

1.11 VLOŽKY Z DOBRĚ TEPELNĚ VODIVÝCH MATERIÁLŮ

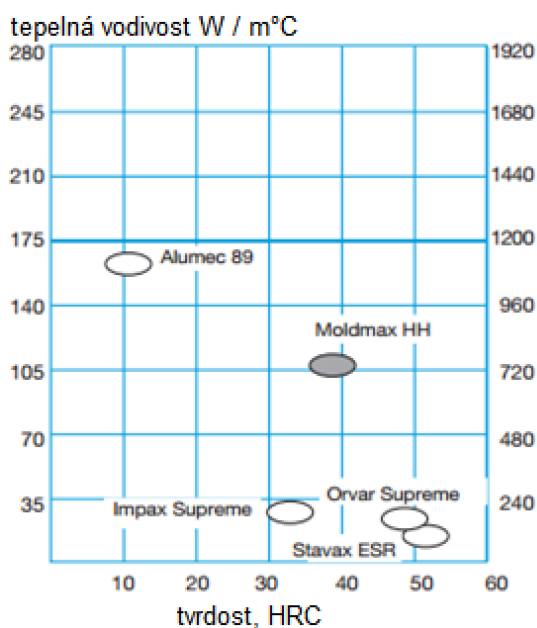
Dalším možným vylepšením při odvádění tepla z tvarově složitých částí je možnost vyložení materiálem s lepší teplotní vodivostí. Toto řešení přispívá k lepšímu rozložení a odvádění tepla. Nevýhodou těchto řešení je značné snížení tuhosti formy.[11]



Obrázek 9. jádro z mědi MECOBOND® (upraveno) [17]

1.12 VYUŽITÍ SPECIÁLNÍCH MATERIÁLŮ

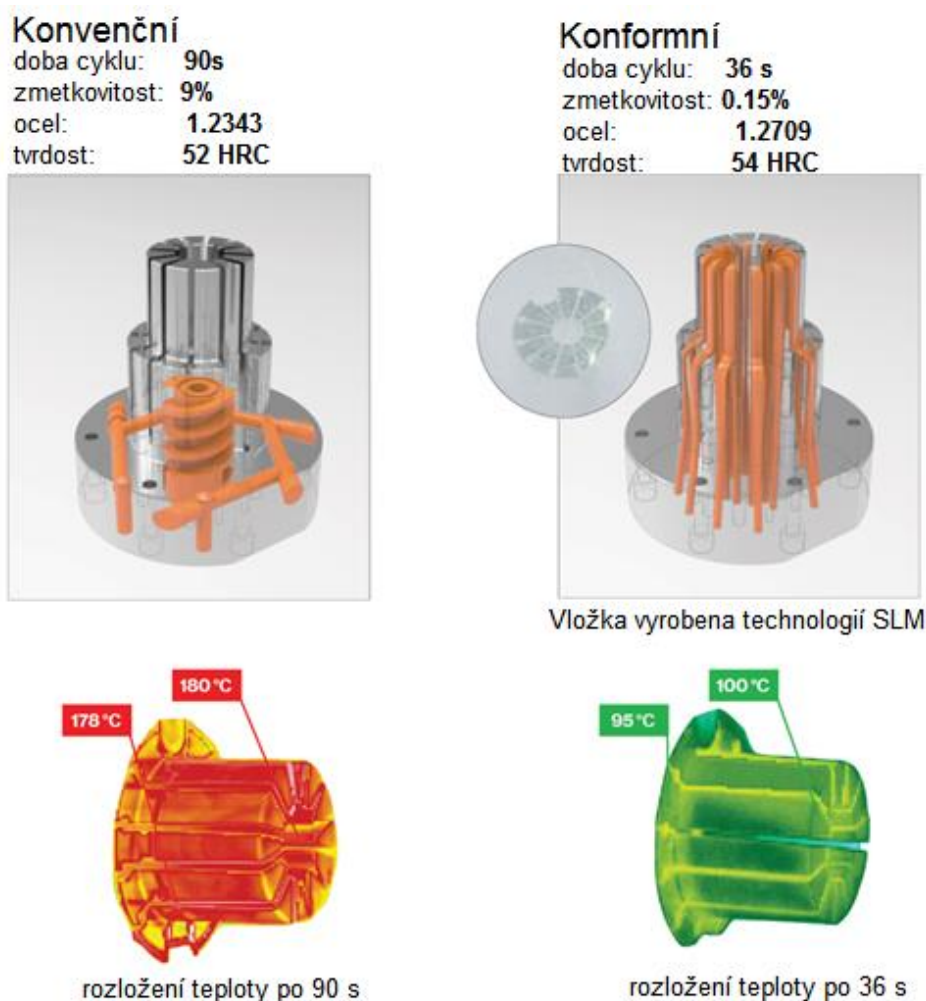
Použití dobře tepelně vodivých materiálů na povrch tvarové dutiny není možné. Hlavním důvodem je nedostatečná tuhost a ořezuvzdornost. Ocel přináší dobré vlastnosti po mechanické stránce, avšak tepelná vodivost dosahuje přibližně $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ to je v porovnání s mědí ($395 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) nízká hodnota. Z toho důvodu je snaha vyvíjet dobře tepelně vodivé materiály při zachování dobrých mechanických vlastností. [11],[12]



Obrázek 10. přehled speciálních slitin firmy Böhler Uddeholm (upraveno) [18]

2 VÝROBA KONFORMNÍHO CHLAZENÍ

Konformní chlazení spočívá v optimalizování temperačních kanálů, tyto kanály kopírují povrch tvarové dutiny a přispívají tak k rychlému a rovnoměrnému ochlazení tvarové dutiny formy. Výrobní čas může být za použití těchto metod snížen až o 50% za současného zlepšení kvality výrobku. Tyto tvarově komplikované prvky temperačního systému je možné vytvořit pomocí technologií aditivní výroby, které sebou přináší možnost vytvoření velmi komplikovaných tvarů, která jsou při konformním chlazení nutná. Výroba tohoto temperačního systému může být kombinací konvenčního a konformního způsobu chlazení. Výroba celé formy, za použití 3D tisku by byla velmi nákladná, proto se v mnohých aplikacích využívá kombinace běžného a konformního způsobu chlazení. [19]



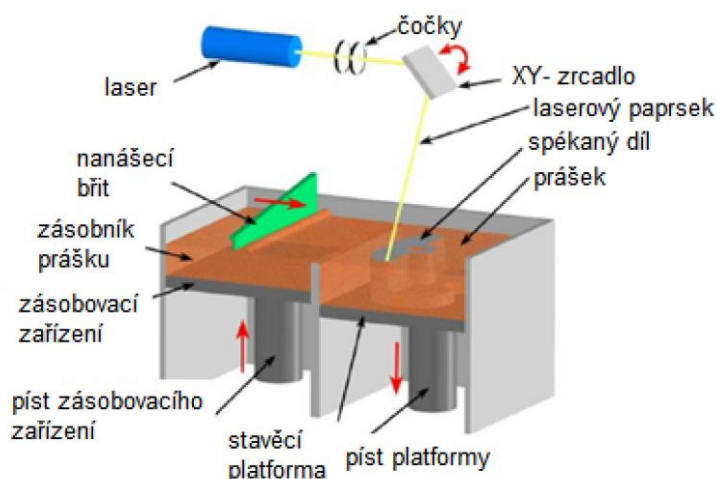
Obrázek 11 Porovnání konvenčního a konformního chlazení.(upraveno) [19]

Optimalizovaná struktura temperačních kanálů odstraňuje nedostatky systémů vyráběných konvenčními způsoby. Plastový dílec je chlazen rovnoměrněji po celém povrchu a nedochází tak ke vnášení vnitřního pnutí v takové míře jako u běžného způsobu chlazení. Správná teplota formy přispívá k tečení materiálu do tvarové dutiny formy, což má pozitivní vliv výsledného povrchu. [19]

2.1 TECHNOLOGIE SLM

Selective Laser Melting pracuje na principu spékání práškových materiálů laserem. Metodou SLM lze zpracovávat mnoho kovových materiálů, jako jsou ocel, měď, hliník, titan nebo jejich slitiny. Vstupními daty pro výrobu tištěného dílu jsou 3D data, která jsou vytvořena v CAD programu jako prostorový model. Tyto data jsou převedena do formátu STL, tento formát je kompatibilní s programy pro přípravu dat pro 3D tiskárnu. Tímto softwarem dochází k rozdělení modelu na jednotlivé vrstvy, které odpovídají konečnému počtu vrstev 3D modelu. Dále můžeme nastavovat jednotlivé parametry, jako je skenovací rychlost, tloušťka vrstvy, generovat podpory a další detailní nastavení. Podle takto vygenerovaného programu je ovládána trasa laseru pro spékání práškového materiálu. [20]

Ze zásobníku práškového kovu je vždy rozprostřena vrstva odpovídající jednomu řezu součástí. Vrstva kovu je následovně natavena laserem, který se pohybuje v rovině XY. Po spečení jedné vrstvy je snížena stavěcí deska o hodnotu odpovídající tloušťce jedné vrstvy a následně se celý proces opakuje až do úplného vystavení součásti. Proces tisku probíhá v inertní atmosféře zamezení oxidace prášku a intenzivní exotermní reakce s kyslíkem [20]



Obrázek 12. princip technologie SLM (upraveno) [21]

2.1.1 APLIKACE SELECTIVE LASER MELTING

Výhodou této technologie je tvarová volnost při návrhu tvarově složitých součástí. Po návrhu v CAD programu a přípravě procesních parametrů je součást připravena k výrobě. Lze tak součást vyrábět v relativně krátkém čase. Vytisknutý díl je nutné dále upravit, jedná se o tzv. post processing. V této fázi dochází k odstraňování podpurných struktur, tepelnému zpracování nebo dalšímu zpracování jakým může být obrábění, svařování nebo úprava povrchu. [20]

Tato technologie tak přináší širokou škálu použití v mnoha oblastech jako je letecký průmysl, automobilový, medicína nebo plastikářský průmysl. Jednou z těchto oblastí je právě výroba konformního chlazení. Při které je možné využít možnosti výroby tvarově komplikovaných temperačních kanálů. [16]

Vzhledem ke svým dobrým mechanickým vlastnostem mohou být takovéto díly použity jako části nosných konstrukcí. Při vysokých nárocích kladených na hmotnost strojního zařízení je možno využít optimalizaci tvaru součástí a docílit tak značné redukce hmotnosti. Možným řešením je použití buněčné struktury a nebo bionických konstrukcí, tyto tvary jsou velmi komplikované a je tak nutné použití speciálních technologií výroby. Takovýmto způsobem je také možno sloučit několik součástí v jednu ve výsledku tak značně zjednodušit výrobu. Ve společnosti General Electric vyvíjeli vstřikovací trysky do plynových turbín tímto způsobem, jsou schopni sloučit dvacet jednotlivých dílců v jeden.[20],[16]



Obrázek 13. palivová tryska GE vyrobená technologií 3D tisku [16]

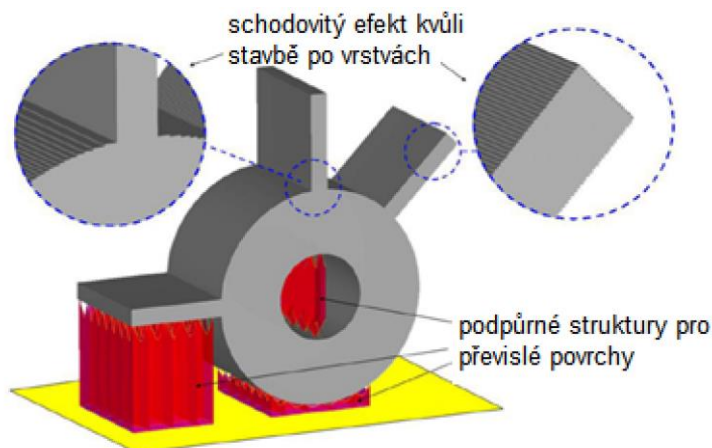
2.2 OMEZENÍ TECHNOLOGIE SLM

Před výrobou dílce technologií Selective Laser Melting, je nutné brát v úvahu některá omezení, která vycházejí z principů výroby po jednotlivých vrstvách. Je nutné správně navrhnout parametry laserového paprsku, tloušťku spékané vrstvy a rychlosti skenování. Dalším nezbytně nutným nastavením je orientace tištěného dílu vzhledem k podkladové desce. Orientace tištěného dílu je důležitá zejména kvůli převislým částem, které jsou problematické pro nastavení vhodných procesních parametrů.[23]

2.2.1 PODPORY

U technologie SLM je nutné vystavění podpor. Podpory mají za úkol podepřít části dílu, které by byly tištěny na volně rozprostřený prášek, bez pevného spojení s tělem součástí. Takto vystavěné díly by nebylo možné vytvořit v požadované kvalitě. Dalšími oblastmi kde je nutné využít podpory, jsou plochy, které svírají se základovou deskou příliš malý úhel a z velké části se tedy staví na volný prášek. Po vytištění je nutné všechny podpory mechanicky odstranit bez poškození součástí. Nevýhodou použití podpor je ovšem zvýšené množství zpracovaného práškového kovu, který je po takovémto spečení znehodnocen. [23]

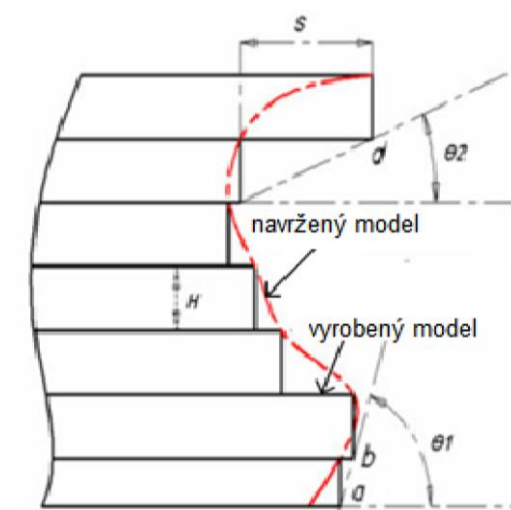
Na obrázku č. 14 můžeme vidět oblasti, ve kterých se používají podpůrné struktury. Jedná se právě o oblasti svírající se stavěcí deskou příliš malý úhel (do 45°) nebo oblast počátku výstavby na stavěcí desce.



Obrázek 14 Ukázka použití podpůrných struktur při stavbě součásti (upraveno) [23]

2.3 VÝSTAVBA PŘEVISLÝCH PLOCH

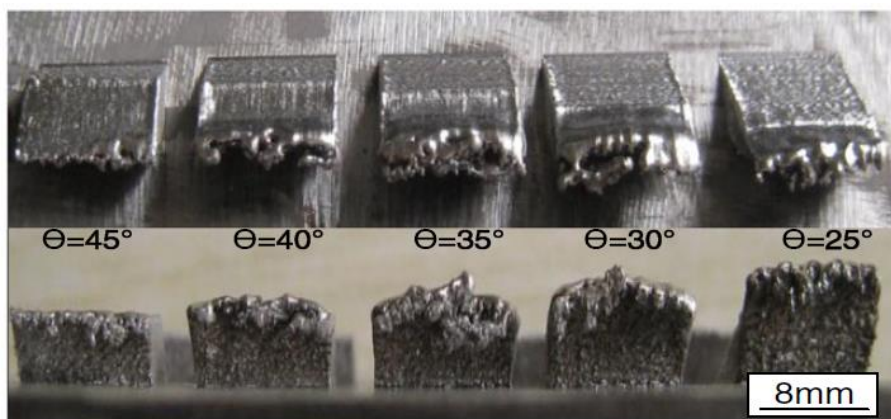
Při vhodném nastavení procesních parametrů je možné dosáhnout vystavení převislých částí pod nižším úhlem bez nutnosti použití podpůrných struktur. Dosáhneme tak úspory materiálů a vyšší volnost při návrhu složitých geometrických tvarů. Takovouto optimalizací procesních parametrů se zabývalo několik výzkumných týmů. Snahou bylo navrzení optimálních parametrů ve snaze zajištění co nejlepší kvality převislých ploch. Většina těchto experimentů se zabývala tiskem vnějších ploch s různými úhly výstavby. Výstavba převislých ploch totiž vyžaduje, aby byla vždy natavena oblast, která má jisté vyložení a není nijak podepřena již vytvořenou součástí. Na obr. 15 je znázorněna výstavba převislé plochy. [23],[24]



Obrázek 15 Geometrie výstavby převislých ploch.(upraveno) [24]

2.3.1 PROPADY NATAVENÉHO MATERIÁLU

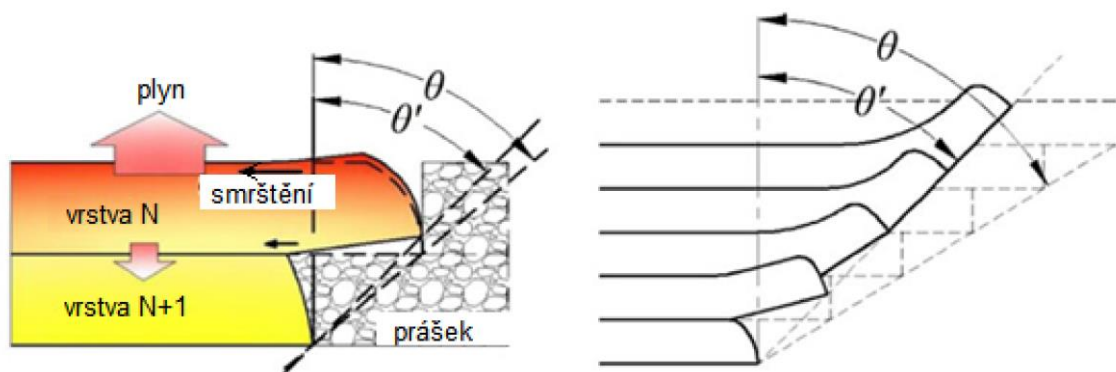
Při tištění přepisných ploch se vždy natavuje oblast, ve které není zajištěno podepření již vytištěným tělesem. Problémem takto natavených oblastí je odvod tepla. Práškový materiál, který obklopuje díl má omezenou schopnost odvodu tepla a zahřátá oblast je tak příliš dlouhou dobu v tekutém stavu. Tavná lázeň se rozšiřuje mimo oblasti ideálního tvaru a propadá se pod úroveň vrstvy, takto vystavěné povrchy tak vykazují velmi nekvalitní vlastnosti povrchu. [24]



Obrázek 16 Propady způsobené akumulací tepla. [24]

2.3.2 DEFORMACE PŘEVISLÝCH ČÁSTÍ

Dalším možným problémem je rozdílné odvádění tepla z převislé vrstvy nataveného kovu. V takto natavené vrstvě dochází k rychlejšímu tuhnutí kovu v horní části vrstvy a později ve spodní části. Následkem toho se prohýbá vrstva směrem vzhůru a dochází k odklonu geometrie od ideálního tvaru. Tento efekt je velmi nepříznivý z hlediska nanášení dalších vrstev prášku. Akumulací tohoto defektu může dojít k situaci, že deformované vrstvy vyčnívají nad nanášenou vrstvu. Takovýto proces je nutné přerušit, v opačném případě by hrozilo poškození stíracího bříty. Takto deformované vrstvy mají také za následek nepřesnou geometrii, neboť dochází k odklonu od ideálního tvaru. [24]



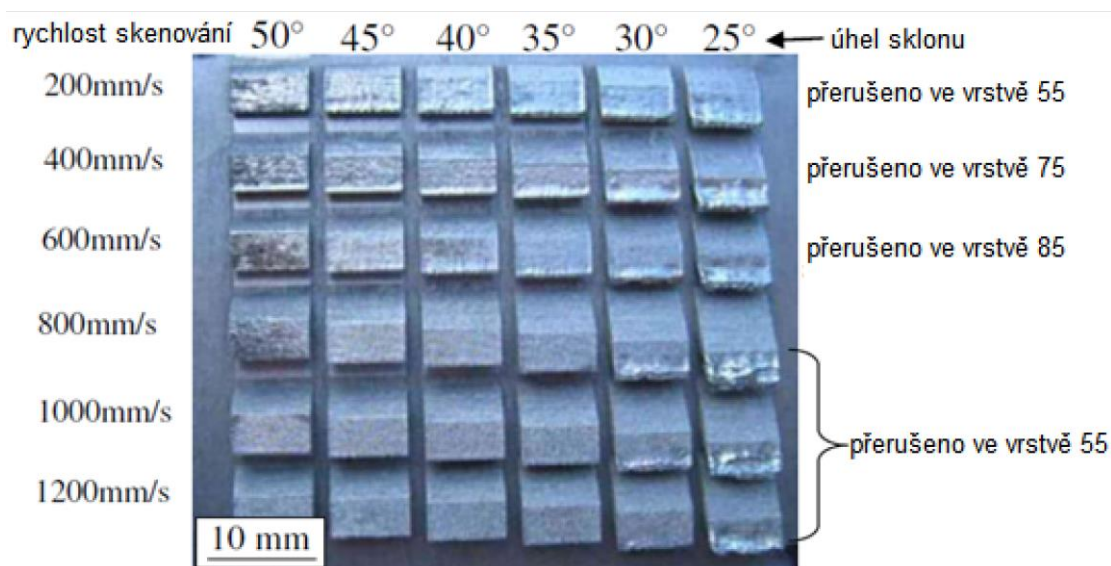
Obrázek 17 Princip deformace převislé plochy.(upraveno) [24]

2.4 VÝZKUMY V OBLASTI VÝSTAVBY PŘEVISLÝCH PLOCH TECHNOLOGIÍ SLM

Tým D. Wanga se ve své studii zabýval optimalizací parametrů tisku. Cílem této práce bylo optimalizovat procesní parametry tisku tak, aby bylo dosaženo spolehlivého vystavení a co nejlepších vlastností převislých ploch. Při testech byl použit materiál 316L, bylo tištěno několik převislých ploch s rozdílnými úhly sklonu. [24]

Tabulka 1 Parametry tisku výzkumné skupiny D. Wanga. [24]

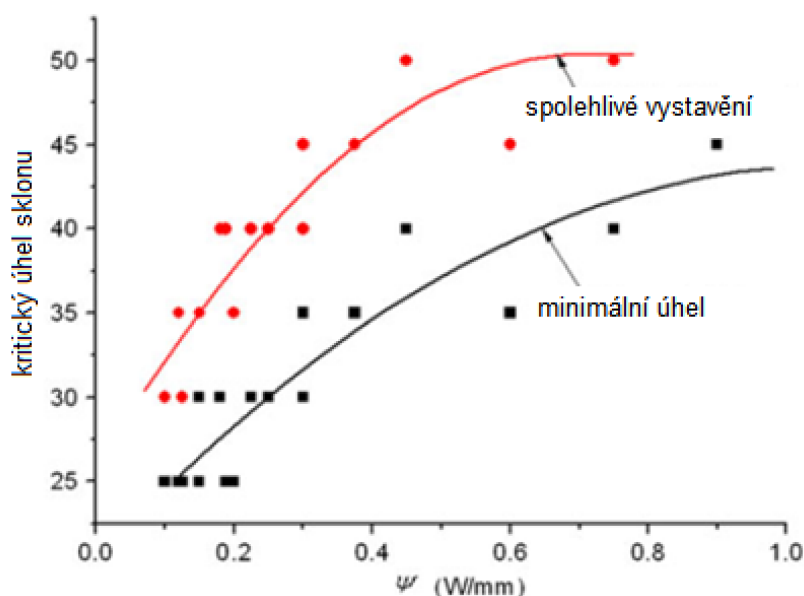
Parametry tisku.					
Materiál	Úhel sklonu	Výkon	Rychlost skenování	Tloušťka vrstvy	Průměr paprsku
316L	25 - 50°	180W	200-1200mm/s	35 μm	80 μm



Obrázek 18 Výroba převislých ploch. [24]

Jak je zřejmé z Obr. 18 v místech s nevyšší energetickou hustotou, docházelo k deformaci vzorku tak velké, že bylo nutné jejich tisk předčasně ukončit a zabránit tak poškození zařízení. V dalších případech kdy byla energetická hustota nízká, došlo k dobrému vystavení převislé plochy, avšak nebylo zajištěno dostatečné propojení jednotlivých vrstev, docházelo tak k delaminaci a nevyhovujícím vlastnostem vytištěného vzorku. Při sérii testů bylo nalezeno optimální nastavení parametrů energetické hustoty tak, aby bylo zajištěno spolehlivé vystavení převislé plochy a zároveň vyhovujících mechanických vlastností. [24]

Optimální hodnoty výkonu a minimálního úhlu svírajícího se základovou deskou jsou vyneseny do grafu Obr. 19. Tyto nalezené hodnoty je pak možné použít při výstavbě převisných ploch u dílů vyrobených technologií SLM.



Obrázek 19 Závislost mezi kritickým úhlem výstavby a energetickým vstupem. (upraveno) [24]

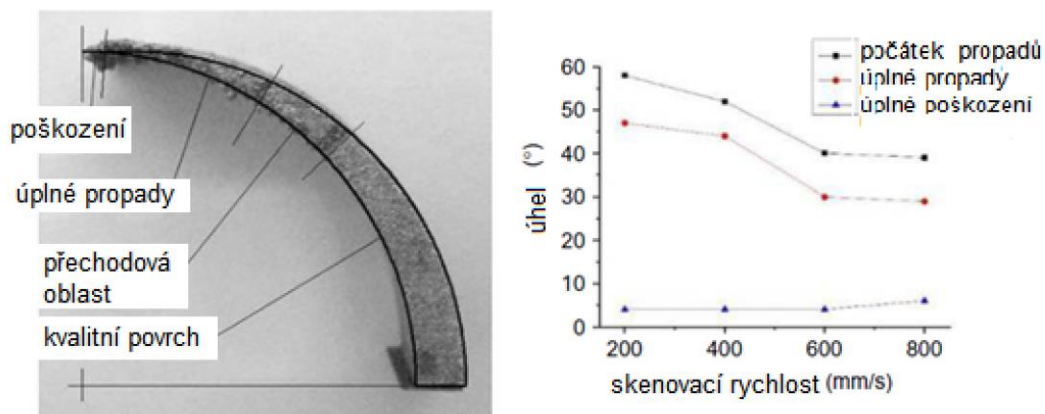
Částí studie výzkumné skupiny Y. Yanga bylo navržení vhodných parametrů pro vystavění převisných ploch bez podpor se zaměřením na kvalitu a porozitu povrchu. Výsledky experimentu ukázaly, že výkon laseru měl rozhodující vliv na stavbu převisných ploch. Při testování byly sledovány místa, ve kterých docházelo k deformaci nebo propadu povrchu. Testy ukázaly závislost kvality povrchu na hustotě energetického vstupu laseru. Navyšováním rychlosti skenování docházelo ke tvorbě povrchu s lepšími vlastnostmi. [25]

Tabulka 2 Parametry tisku Y. Yanga [25]

Parametry tisku.			
Materiál	Výkon [W]	Rychlost skenování [mm/s]	Tloušťka vrstvy [μm]
ANSI 316L	120	200-800	25

K testování bylo vybráno těleso s vnitřním zaoblením, tak aby bylo možné přesně určit úhel, při kterém začalo docházet k povrchovým vadám. Pro vystavění takového dílu byla použita metoda ortogonálního skenování. Do grafu byly následně zaznamenány úhly, při kterých se začínaly projevovat vady převisného povrchu. [25]

Na Obr. 20 jsou vyznačeny oblasti, ve kterých jsou parné rozdíly s různými vlastnosti povrchu. U nejstrmějších částí byl vytvořen kvalitní povrch, avšak se snižujícím se úhlem se začínají projevovat vady.



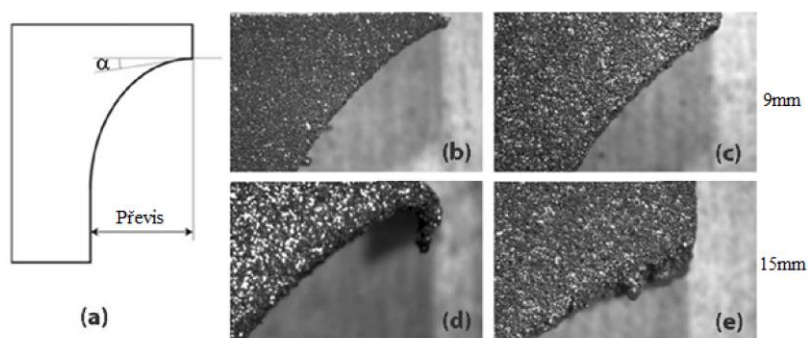
Obrázek 20 Vliv rychlosti skenování na stavbu převíslých ploch.(upraveno) [25]

F. Calignano ve své práci zkoumal přesnost konkávních a konvexních převíslých ploch vyráběných technologií SLM. Zajištění spolehlivého vytištění takovýchto ploch je nezbytné pro kvalitní výrobu otvorů a kanálů. Cílem bylo určit minimální úhel, při kterém jsou možné převíslé povrchy tisknout bez podpurných struktur a porovnání parametrů pro dva druhy materiálů. [26]

Tabulka 3 Parametry tisku F. Calignana [26]

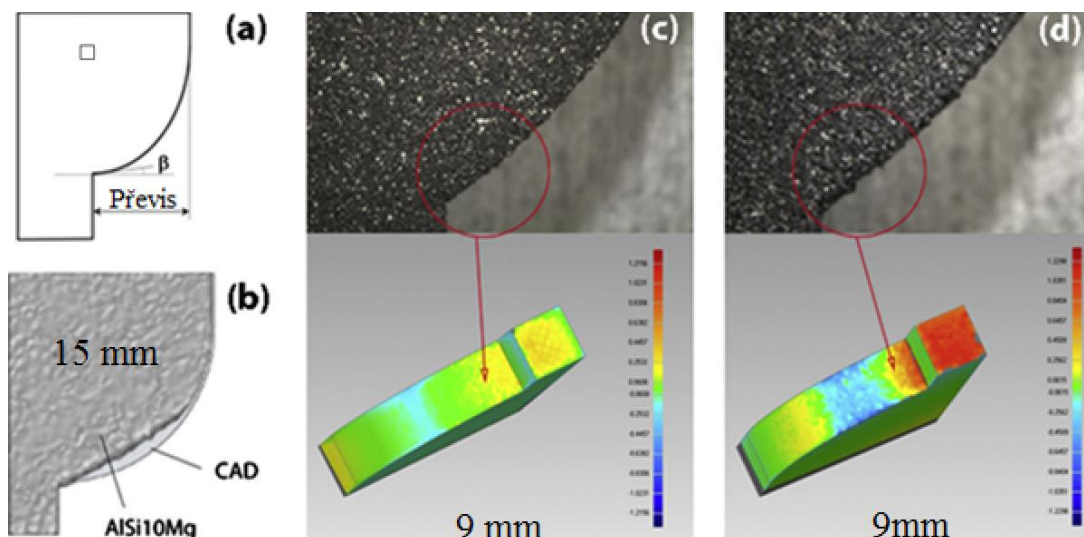
materiál	rychlost [mm/s]	výkon [W]	vrstva [μm]	průměr paprsku [mm]
AlSi10Mg	jádro 800	120	30	0.1
	povrch 800	195		
Ti6Al4V	jádro 1000	170	30	0.1
	povrch 1250	150		

Pro analýzu byl využit stereomikroskop a 3D optický skener. Získané snímky byly porovnány s CAD modelem.



Obrázek 21 konkávní těleso a) CAD předloha Ti6Al4V: (b),(d) AlSi10Mg: (c),(e)upraveno [26]

Testy ukázaly, že díly mohou být vystavěny již pod úhlem 30° to jak v případě hliníkové tak i titanové slitiny. Z Obr. 21 je patrné, dosažení vyššího rozlišení u titanového vzorku. Při výstavě s převisem 15mm došlo u vzorku z Ti6Al4V ke zborcení vrchní části. U dílu z AlSi10Mg se tento defekt neprojevil, avšak došlo k silné deformaci a vychýlení z ideální geometrie. Výstavbou konvexních těles bylo opět potvrzeno dosažení lepšího rozlišení u titanové slitiny. Vzorek vyroben ze slitiny hliníku vykazoval zhoršenou geometrickou přesnost. Maximální odchylka od CAD modelu činila pro slitinu hliníku 1.23mm (červená barva), pro slitinu titanu 0.9mm. [26]



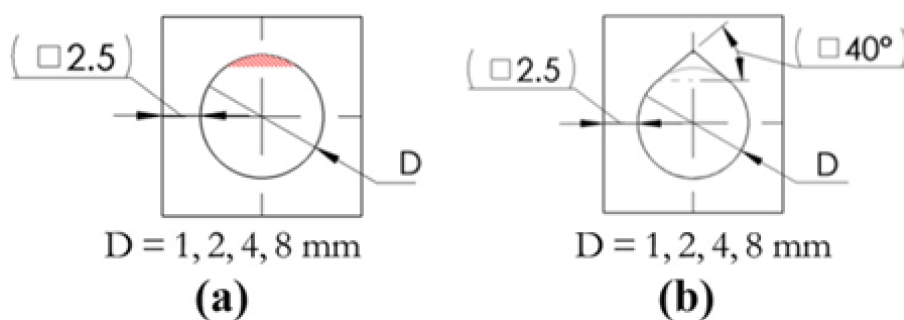
Obrázek 22 konvexní těleso (a) CAD předloha (b) porovnání s modelem (c) Ti6Al4V (d) AlSi10Mg (upraveno) [26]

V části práce týmu D. Wanga bylo také testována výstavba kruhových kanálů za použití řízeného energetického vstupu. Jádru součásti je tištěno běžným způsobem, avšak u okrajů je snížena energetická hustota. Změny energetické hustoty probíhají změnou rychlosti skenování. Na okraji převislé plochy tak nedochází k propadům a deformacím. Optimalizace energetického vstupu je řízena na základě úhlu svírajícího se základovou deskou. Při tištění kanálů byla jeho geometrie rozdělena do tří oblastí, přičemž v oblasti h_3 viz Obr. 23 bylo využito optimalizace parametrů. Z Obr. 22 je také patrné, že došlo k významnému zdokonalení výstavby kruhových kanálů. [24]



Obrázek 23 (a) geometrie kanálu (b) oblast h_3 600mm/s (c) oblast h_3 200mm/s [24]

Tým M. Mazura se ve svém výzkumu zaměřili na optimalizaci tvaru kanálu pro výrobu technologií SLM. Nejprve byly tištěny díly bez optimalizované geometrie, u kterých se projevovalo propadávání materiálu pod ideální geometrii kanálu. Byly tištěny kanály s rozměry 1, 2, 4, 8 mm. Dalším krokem bylo určení kritického úhlu výstavby. Z jejich předchozích testů byl vybrán kritický úhel výstavby převyšující plochy 40° a dle toho úhlu byla následně optimalizována geometrie kanálů. Výsledkem je pak kanál s geometrií, která nepřekročí kritický úhel výstavby.[23]

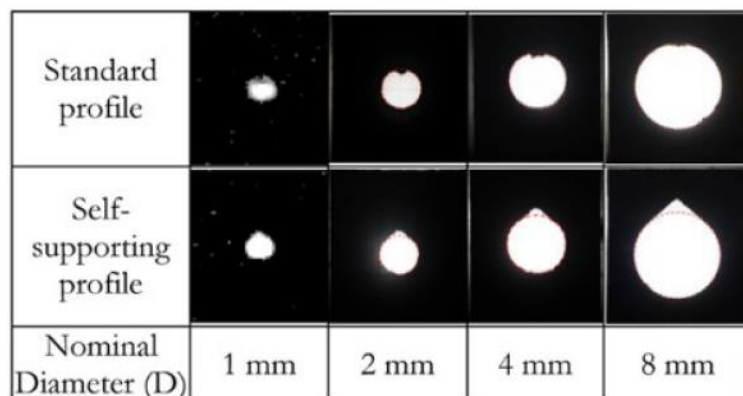


Obrázek 24 (a) kritické místo výstavby (b) optimalizovaná geometrie [23]

Tabulka 4 Parametry tisku M. Mazura [23]

Parametry tisku.				
Materiál	Výkon [W]	Rychlost skenování [mm/s]	Tloušťka vrstvy [μm]	Průměr paprsku [μm]
H13	375	868	30 μm	0.12

Jak je patrné z Obr. 25 u kruhových kanálů docházelo k deformaci vrchní části u všech průměrů, u optimalizovaných kanálů byly tyto defekty potlačeny. U vytištěných kanálů se následně pozoroval skutečný tvar. Kanál s průměrem 1mm se částečně podařilo vytvořit, avšak na některých místech byla dutina zanesena nataveným práškem a byla tak zabráněna průchodnosti kanálu, byl tak vyřazen jako nevyhovující. Ostatní kanály byli průchozí a tak mohly být vyhodnoceny jejich skutečné rozměry.[23]



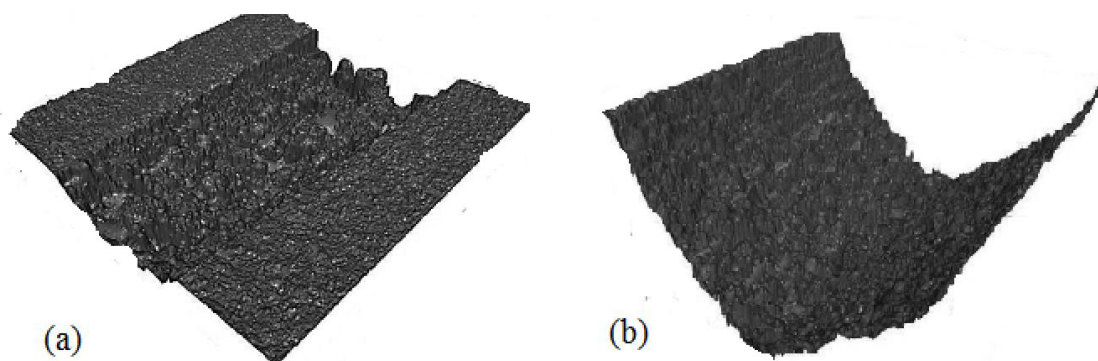
Obrázek 25 Kruhové kanály a kanály s optimalizovanou geometrií.[23]

V tabulce 5. jsou uvedeny teoreticky přesné rozměry a skutečně naměřené hodnoty vytištěného kanálu.

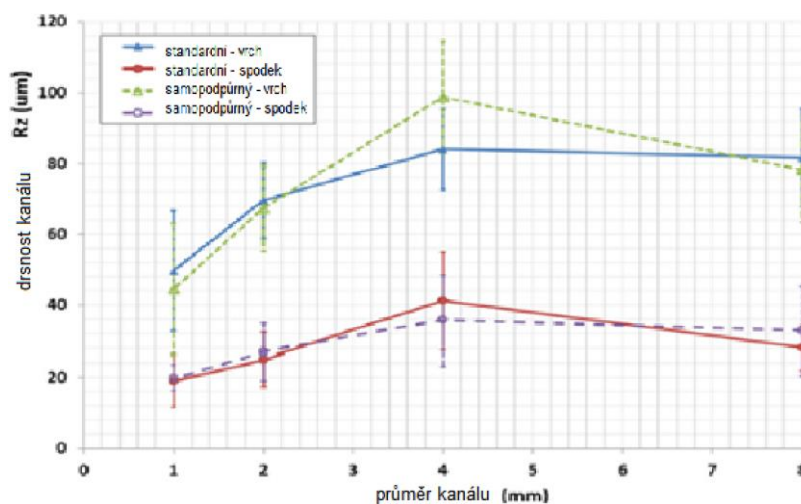
Tabulka 5. skutečné rozměry kanálu [23]

Parametr	kruhový kanál				kanál s upravenou geometrií			
nominální výška kanálu [mm]	8	4	2	1	9.22	4.61	2.31	1.15
skutečná výška [mm]	7,9	3,92	1,96	X	8,99	4.21	1.92	X

Pro analýzu drsnosti povrchu kanálů byl použit konfokální mikroskop. Z obr. 26. je patrný rozdíl v drsnosti převíslé plochy.



Obrázek 26 Horní část tištěných kanálů. (a) kruhový kanál (b) optimalizovaný kanál [23]



Obrázek 27 Drsnosti jednotlivých kanálů [23]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍLE PRÁCE

Metodou selective laser melting je možno využít v oblasti výroby chladících kanálů pro vložky konformního chlazení vstřikovacích forem. Je obecně známo, že lze chladící kanály tisknout, avšak tato metoda má některá svá omezení, tak jak bylo popsáno v předcházejících kapitolách. Pro spolehlivou výrobu je nutné, abychom byli obeznámeni s kritickými oblastmi při tisku. Cílem proto bylo navržení experimentálních těles s rozdílnými průměry a sklony kanálů. Na těchto vzorcích by se měly projevovat vady způsobené převislou geometrií kanálů bez podpůrných struktur. Tyto vzorky budou vytištěny ze slitiny mědi. Vady projevující se při tisku převislých ploch, vznikají v důsledku špatného odvodu tepla. Z tohoto důvodu se dá předpokládat, že za použití slitiny mědi a jejími výrazně lepšími tepelně vodivými vlastnostmi, bude dosaženo lepších výsledků a kanály bude možné tisknout, bez výrazného zhoršení geometrie. Po závěrečné analýze budou známa kritická místa a při shodných parametrech tisku bude možné tyto informace využít při návrhu kanálů.

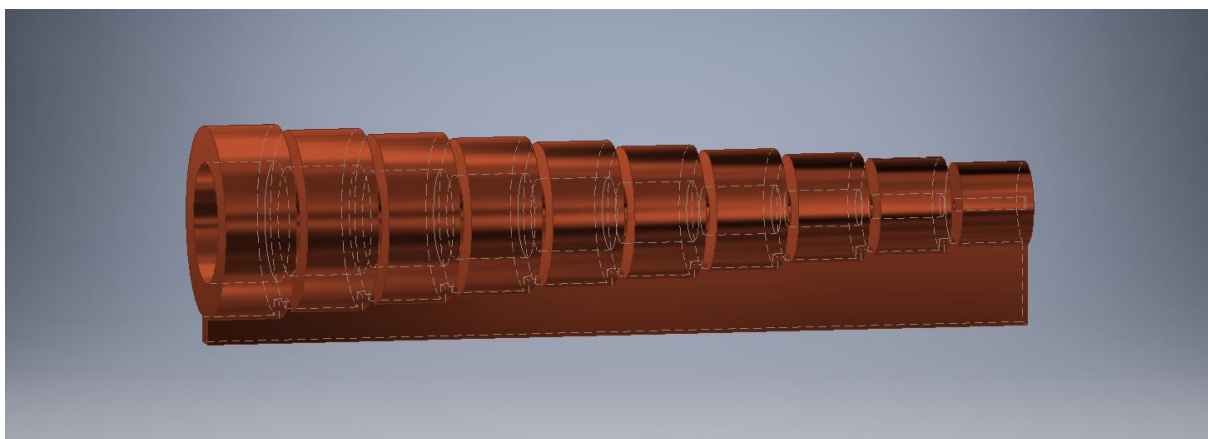
4 PŘÍPRAVA EXPERIMENTÁLNÍCH VZORKŮ

Při návrhu experimentálních vzorku bylo požadováno, aby byly ověřeny různé průměry kanálů, neboť je výstavba závislá na velikosti rizikové oblasti viz Obr. 24. Dále je známé, že výstavba převislých ploch bez podpůrných struktur není problematická při úhlu svírajícím se stavěcí deskou přibližně nad 45°, Z tohoto důvodu je nutné navrhnout kanály pod různými úhly výstavby, aby bylo možné pozorovat vady vznikající pod rozdílným úhlem sklonu, a vyhodnotit jejich závažnost. Rozměry stavěcí desky byly 100 × 100 mm, do tohoto prostoru se tak musely umístit všechny vzorky, tak aby bylo možné vytištění během jedné stavby.

Všechna tělesa byla vytvořena v softwaru Autodesk Inventor. Při návrhu bylo vhodné vymodelovat tělesa tak, aby bylo možné jejich vytištění bez podpůrných struktur. Dále byl kladen důraz na eliminaci nepotřebného materiálu a snížení strojního času.

4.1 VZOREK Č. 1

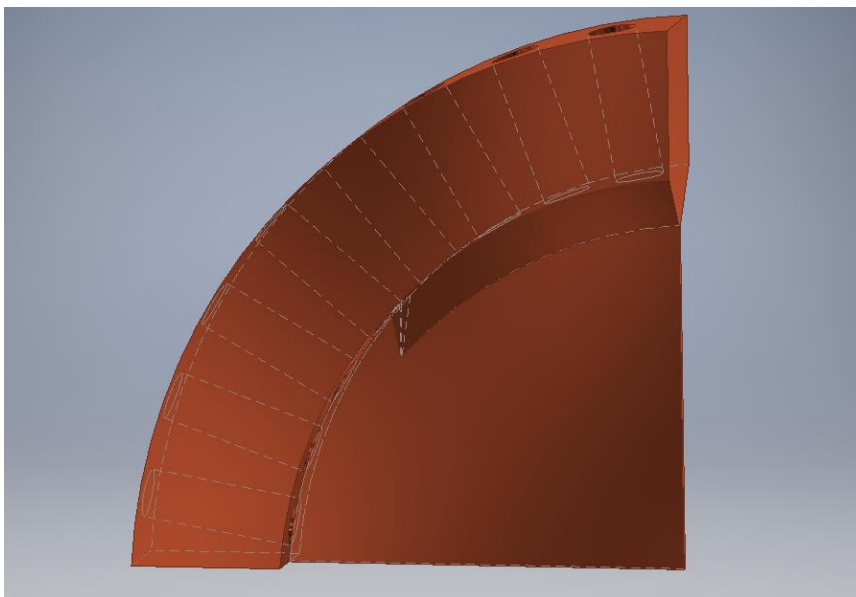
U tohoto vzorku bylo vytvořeno 10 kroužků s průměry od 1mm do 10mm v délce 6mm, na takto vytvořeném vzorku bude možné pozorovat poruchy převislé části, v závislosti na průměru kanálu. Takto vytvořený vzorek bude vytištěn v jednom exempláři. Těleso nebylo potřeba nijak upravovat pro eliminaci podpor



Obrázek 28 vizualizace experimentálního vzorku č. 1

4.2 VZOREK Č. 2

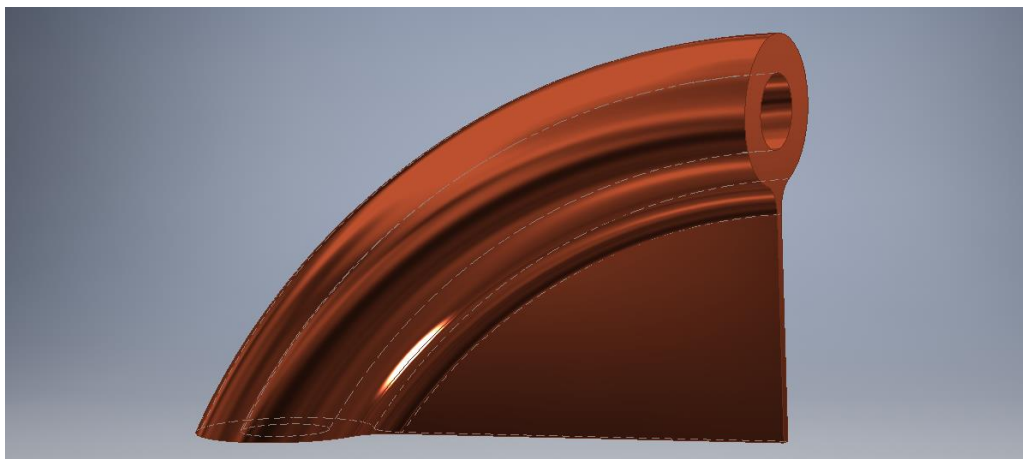
Tento typ vzorku byl navržen tak aby bylo možné umístit do jednoho tělesa všech 8 kanálů daného průměru. K vyhodnocení vlastností kanálu byla zvolena délka 25mm, dále bylo zvoleno uspořádání do čtvrtkruhu tak aby těleso zaujímalo co nejmenší prostor na stavěcí desce. Z tohoto uspořádání však vyplynulo nutnost použití žebra, které bude plnit funkci podpory. Tento vzorek bude vytvořen ve stejné konfiguraci s různými rozměry pro kanály o průměrech 2, 4, 6 a 8 mm.



Obrázek 29 vizualizace experimentálního vzorku č. 2

4.3 VZOREK Č. 3

Posledním typem vzorku jsou kanály ve tvaru trubky. Takovýto vzorek byl vytvořen za účelem pozorování různých struktur povrchu a vznikajících defektů na převalé straně kanálu. Vzhledem k tvaru bylo nutné tak jako u vzorku č. 2 použít žebro aby bylo zabezpečeno vystavění trubky a bylo možno pozorovat dutinu kanálu. Tento vzorek bude taktéž vytvořen ve více konfiguracích s průměry 2, 4, 6, a 8 mm.



Obrázek 30 vizualizace experimentálního vzorku č. 2

4.4 PŘÍPRAVA DAT PRO TISK

Data vymodelovaná v softwaru Autodesk Inventor byla převedena do formátu stl. Tento formát je dále nutný při zpracování dat pro 3D tiskárnu. Závěrečná příprava dat probíhala v softwaru Materialise Magics. V tomto programu bylo nutné uspořádat všechna tělesa na stavěcí desku a nastavit další parametry tisku. Dále je možné využít automatické generování podpůrných struktur. Tuto funkci však nebylo nutné použít, jelikož připravené vzorky byly vystavěny přímo na podkladové desce bez využití podpor. Převíslé části, u kterých se nepozorovala jakost povrchu, byli podepřeny předpřipravenými žebry a zkoseními. Nastavované procesní parametry vycházely ze studie provedené Martinem Kočicou v předchozím akademickém roce. [27]

Tabulka 6 parametry pro výrobu experimentálních vzorků [27]

Materiál	Rychlost skenování [mm/s]	Výkon laseru [W]	Tloušťka vrstvy [μm]	Průměr paprsku [mm]
Cu7.2Ni1.8Si1Cr	jádro 1200	400	5	0.1
	povrch 800	350		

Po přípravě těchto dat bylo možné vygenerovat výrobní data ve formátu *.slm. Po vygenerování bylo možno překontrolovat postup výstavby vrstvy po vrstvě a ujistit se tak o správném prostupu výstavby experimentálních těles.

4.5 POPIS ZAŘÍZENÍ

Tisk probíhal na tiskárně SLM 280 HL, která je osazena Yterbiovým vláknovým laserem o výkonu 400 W pro zpracování kovových materiálů. Pracovní prostor pro výrobu dílů dosahuje 280 x 280 x 350 mm. Tiskárna je schopna vytisknout až 35 cm³/h v závislosti na uspořádání jednotlivých dílů nebo struktury dílu. V průběhu stavby je pracovní komora naplněna inertním plynem, a to buď argonem, nebo dusíkem, který si je tiskárna schopna sama produkovat.

5 PRŮBĚH VÝSTAVBY A DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Při tisku nedošlo k výrazným poruchám na převislých částech kanálů tak, aby bylo nutné stavbu ukončit. Během výstavby byl však problém s doplňováním prášku u nanášecího zařízení. Na tomto zařízení spolehlivě nefungoval senzor signalizující nedostatek prášku, a tudíž nebylo možné automatické doplňování. Z tohoto důvodu bylo nutné po celou dobu tisk kontrolovat, a přes ovládací systém zadávat příkazy pro doplnění prášku. Dále pak nastal problém s lineárním vedením nanášecího zařízení a bylo nutné stavbu přerušit, doplnit mazivo a stavbu opět spustit.

5.1 PORUCHY BĚHEM VÝSTAVBY

Jak je z Obr. 30 patrné, že na vzorcích jsou v horizontálním směru pravidelné pruhy, které byly vytvořeny přerušením procesu a doplňováním prášku. Tyto pruhy jsou však jen povrchové a na vnitřní strukturu nemají vliv. Ve zvýrazněné části je patrné porušení stěny vzorku. V této oblasti došlo k neúplnému nanesení vrstvy prášku, laser přeskenoval již dříve natavenou vrstvu. Následkem toho nedošlo k vyhovujícímu propojení následujících vrstev. Z hlediska výstavby kanálů s proudícím médiem by byla takováto oblast kritická a docházelo by k úniku kapaliny.



Obrázek 31 vytištěné experimentální vzorky na stavěcí desce (vlastní foto)

Na experimentálním vzorku č. 2 - 8 mm, došlo k utržení podpůrného žebra tak jak je patrné z Obr. 32. Takovéto porušení podpůrné struktury nastalo v následkem rozdílného ochlazování vytištěného tělesa. Tenké žebro chladlo rychleji a v místě vrubu došlo k porušení. Porušení podpůrné struktury může mít za následek deformaci tělesa. V našem případě však toto porušení

nemá vliv na následné vyhodnocování kvality vytištěných kanálů. V případě, že by se jednalo o součást vyžadující vysokou přesnost, musely by být navrženy podpůrné struktury tak, aby nedošlo k utržení a následné deformaci vzorku.

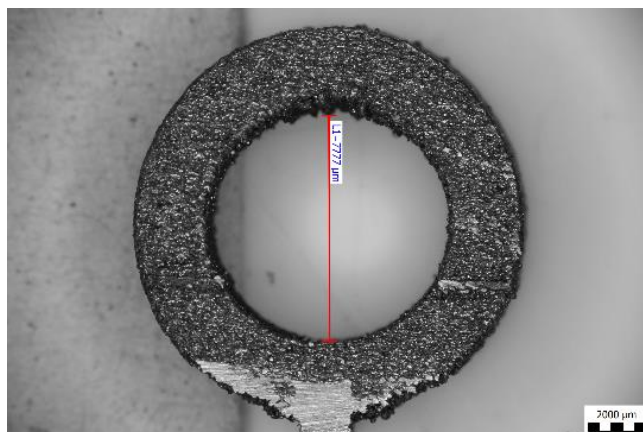


Obrázek 32 Porušení podpůrného žebra. (vlastní foto)

Po vytištění dílů následovalo odstranění od základnové desky rozřezání zkušebních vzorků v podélném směru (všechny kromě vzorku č. 1), tak aby mohly být kanály dále analyzovány. Vzorky č. 2 - 2mm a č. 3 - 2 mm museli být odstraněny manuálně, vzhledem k jejich malým rozměrům nebylo možné kanály rozřezat samostatně, z tohoto důvodu byly vyřazeny z dalšího testování

5.2 KONTROLA PRŮMĚRU EXPERIMENTÁLNÍHO TĚLESA Č. 1

U vzorků toto typu byl pozorován skutečný rozměr kanálu ve svislém směru, tento rozměr bude následně porovnán s teoreticky přesným modelem. Je sledován vliv průměru na velikost deformace kanálů. Těleso č. 1 bylo rozděleno na jednotlivé segmenty, u kterých byl analyzován skutečný rozměr. Fotografie byli pořízeny pomocí optického mikroskopu Olympus SZX7 a fotografie následně zpracovány v softwaru QuickPHOTO micro.

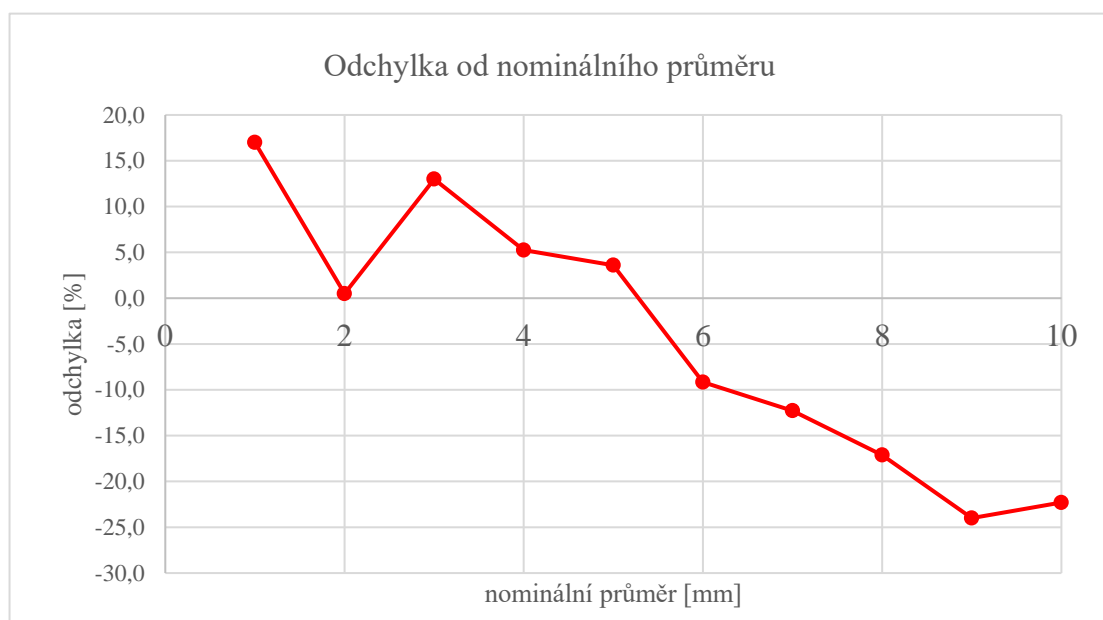


Obrázek 33 měření kanálu (vlastní foto)

Tabulka 7 skutečná výška kanálů

rozměr [mm]	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
skutečný rozměr [mm]	7,77	6,84	6,63	6,14	5,45	5,18	4,21	3,39	2,01	1,17
odchylka [mm]	-2,23	-2,16	-1,37	-0,86	-0,55	0,18	0,21	0,39	0,01	0,17
odchylka [%]	-22,30	-24,00	-17,13	-12,29	-9,17	3,60	5,25	13,00	0,50	17,00

Jak je patrné z Obr. 34, u kanálů s malým průměrem docházelo ke zvětšení kanálu. U větších se začínaly projevovat propady vlivem velké nepodepřené oblasti svírající se základovou deskou nízký úhel.

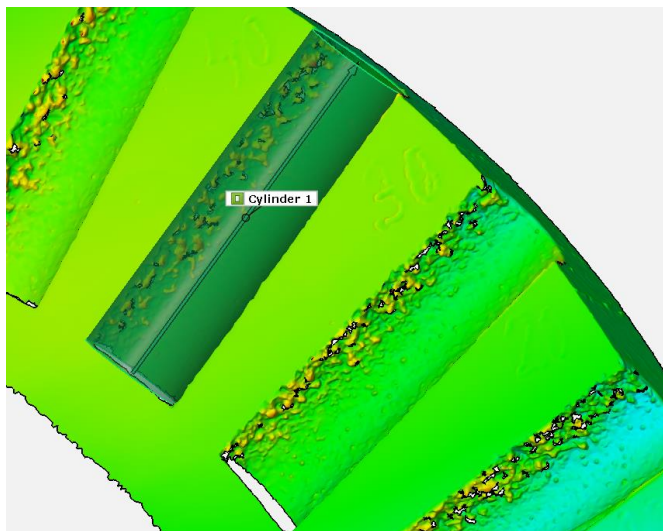


Obrázek 34 graf odchylky od nominálního průměru

Všechny jednotlivé kanály jsou detailně nafoceny a fotografie jsou v příloze 2.

5.3 ANALÝZA PRŮMĚRU KANÁLU V ZÁVISLOSTI NA ÚHLU SKLONU

Při analýze průměru v závislosti a úhlu sklonu byl použit 3D optický skener ATOS TripleScan 8M a software GOM Inspect.

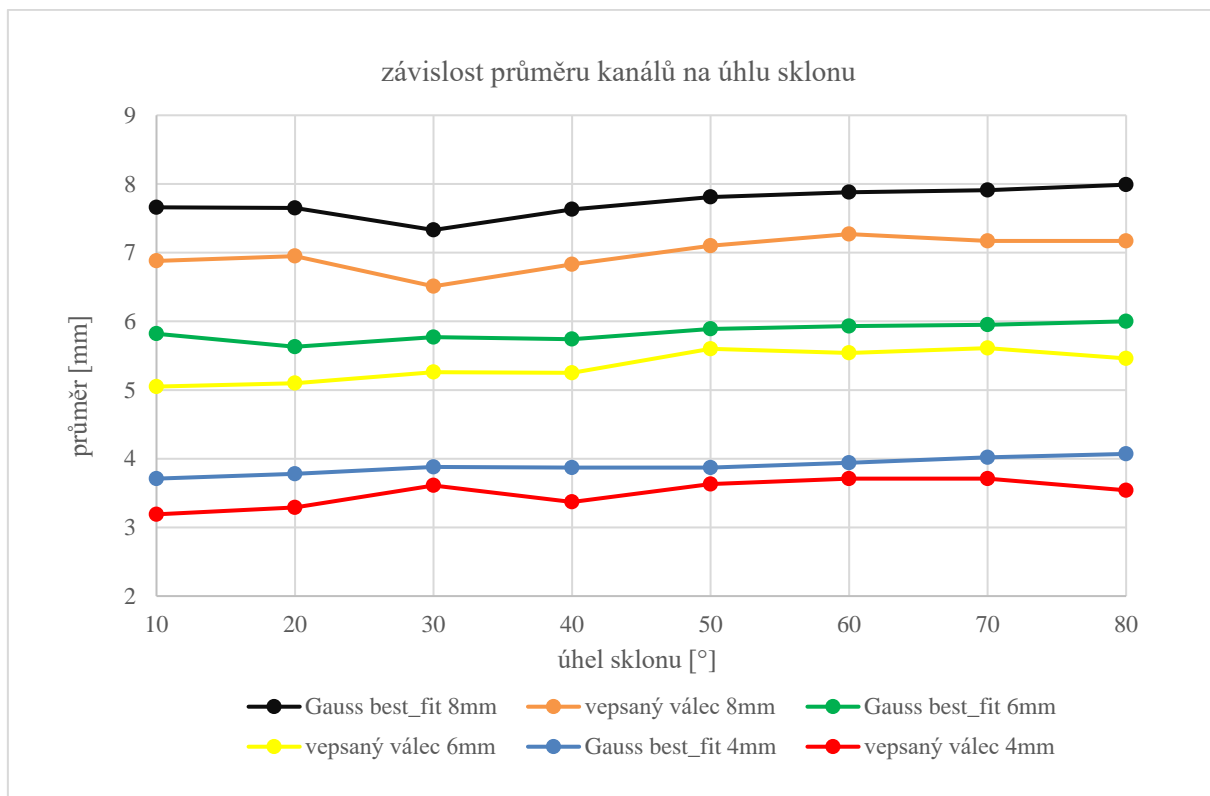


Obrázek 35 ukázka analýzy průměru kanálu vzorek č. 2 – 8 mm

V tomto testu byly na skenovány všechny odstupňované vzorky a následně vyhodnoceny průměry kanálů. Do kanálů byl umístěn válec pomocí funkce Gaussian best-fit, takto funkce vyhodnotí válec reprezentující skutečný průměr včetně všech nerovností. Další krokem bylo vložení maximálního vepsaného válce. Pro vyhodnocení skutečného průchozího průměru kanálem.

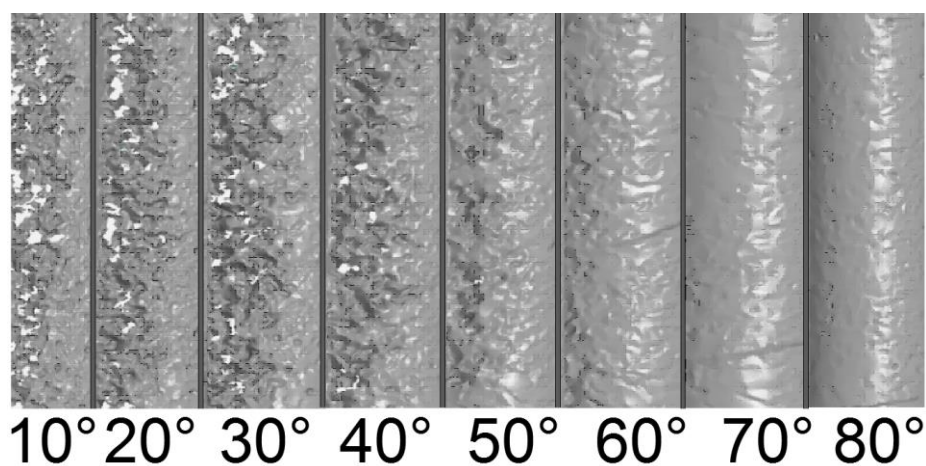
Tabulka 8 hodnoty průměru kanálů

úhel sklonu [°]	4mm		6mm		8mm	
	gauss	vepsaný	gauss	vepsaný	gauss	vepsaný
80	4,07	3,54	6,00	5,46	7,99	7,17
70	4,02	3,71	5,95	5,61	7,91	7,17
60	3,94	3,71	5,93	5,54	7,88	7,27
50	3,87	3,63	5,89	5,60	7,81	7,10
40	3,87	3,37	5,74	5,25	7,63	6,83
30	3,88	3,61	5,77	5,26	7,33	6,51
20	3,78	3,29	5,63	5,10	7,65	6,95
10	3,71	3,19	5,82	5,05	7,66	6,88



Obrázek 36 graf závislosti průměru kanálů na úhlu sklonu

Se snižujícím se úhlem vidíme trend snižování průměru, avšak mezi 40° a 30° se tento trend mění. Na Obr. č. 37 jsou vidět horní části kanálů, u těchto kanálů nebylo možné úplně naskenovat strukturu kanálu, horní části byli zdeformované natolik, že kamera skeneru nedokázala nasnímat povrchy, které byli zastíněny propadlým materiálem. V těchto oblastech vidíme otvory, z tohoto důvodu jsou rozměry zkresleny.

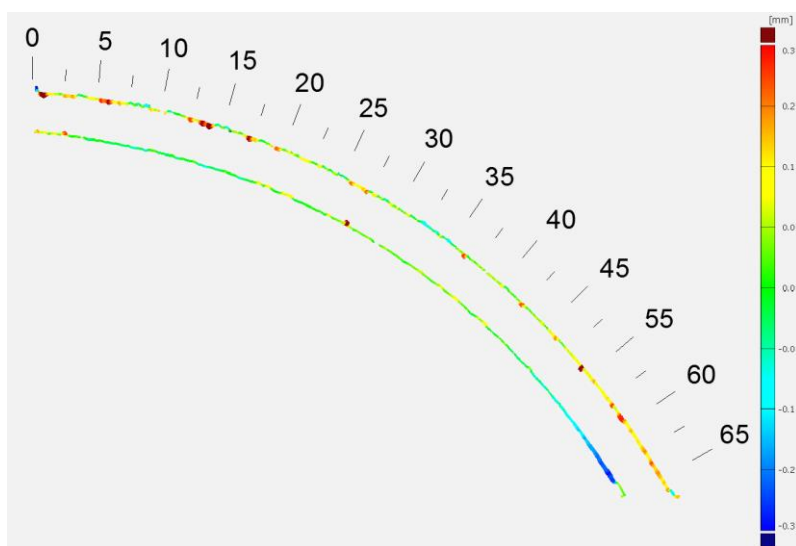


Obrázek 37 poruchy při skenování kanálů (vzorek č. 2 - 8mm)

V příloze 1. jsou zobrazeny obrázky porovnání ideální geometrie a vytištěných vzorků, a v Příloze 2 detailní fotografie z optického mikroskopu.

5.4 ANALÝZA VÝVINU VAD NA PROMĚNLIVÉM ÚHLU STOUPÁNÍ

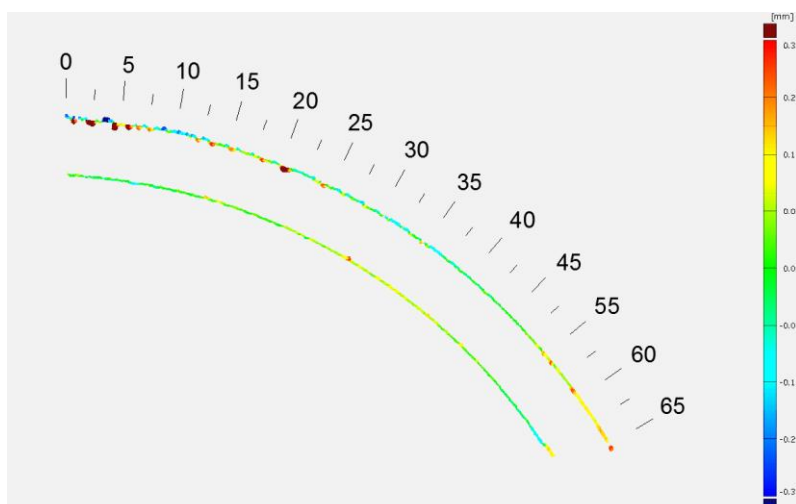
Tyto vzorky byly naskenovány a následně porovnány s geometricky přesným modelem bylo tak možné pozorovat odchylky skutečného kanálu. Porovnání geometrie bylo provedeno na podélném řezu kanálem. U všech kanálů jsou stěny kanálu ve spodní části odchýleny od ideálního tvaru ve větší míře, to bylo způsobeno přerušením tisku a následným napojením, toto napojení výroby se bohužel nepodařilo přesně na stejném místě.



Obrázek 38 řez kanálem (průměr 4mm)

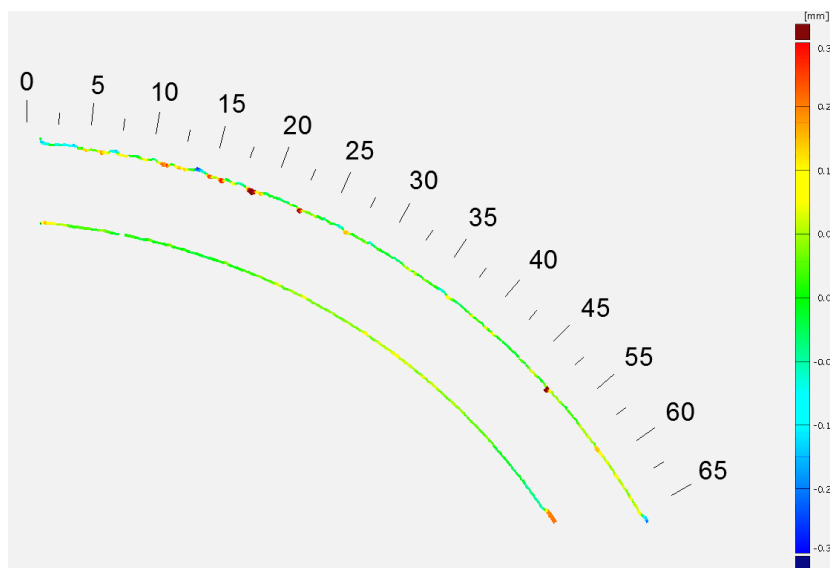
Na Obr. 38 vidíme drobné nerovnosti v po celé délce kanálů, jedná se však o lokální poruchy, které výrazně nenarušují geometrii kanálu. Při úhlu kanálu svírajícím s podkladovou deskou přibližně 30° vidíme počátek akumulace vyššího počtu vad. Tyto vady zhoršují kvalitu povrchu, ale nedošlo k takové deformaci, aby byl kanál zaslepen.

Kanál s průměrem 6mm vykazoval dobrou kvalitu povrchu do uhlu odpovídajícímu přibližně 25°. V horní části kanálu se začala kvalita povrchu rapidně zhoršovat, avšak kanál zůstal i nadále průchozí.



Obrázek 39 řez kanálem (průměr 6mm)

U kanálu s průměrem 8mm se začínaly projevovat výrazné vady od úhlu 20° tyto vady nebyli nijak závažné a kanál se podařilo vytvořit v dobré kvalitě, bez výrazné deformace geometrie.



Obrázek 40 řez kanálem (průměr 8mm)

V příloze 1. jsou na k dispozici naskenované vzorky a porovnány s ideální geometrií.

6 DISKUZE

Pro testování kanálů bylo navrženo devět testovacích vzorků s rozdílnou geometrií. U všech těchto vzorků byl kladen důraz na to, aby bylo možné pozorovat oblast kanálů, která není nijak podepřena podpůrnými strukturami. Vzorky č. 2 a č. 3 musely být odstraněny od základové desky manuálně proto, aby mohly být ostatní tělesa rozřezány ještě upevněné na stavěcí desce. Tyto malé vzorky vzhledem k jejich malé velikosti nemohly být rozříznuty a analyzovány. Pro další analýzu vzorků bude nutné vytvořit přípravek pro upevnění těchto malých těles do drátořezu a po jejich rozříznutí provést vyhodnocení jako u ostatních vzorů. Tyto úpravy se bohužel nepodařilo provést z důvodu vysoké vytiženosti řezacího zařízení.

Pro vyhodnocení vzorku č. 1 bylo nutné rozdělit těleso na samostatné kroužky. Následně bylo možné pozorovat skutečnou velikost. Velikost kanálu byla měřena v ose ode dna k nejnižšímu místu deformovaného kanálu. Z výsledků je zřejmé, že u kanálků s malým průměrem docházelo ke zvětšení průměru. Se zvětšujícím se průměrem rostla deformace převalské části a efektivní průměr kanálu se zmenšoval. Dále je nutné podotknout, že tyto kanály byly orientovány rovnoběžně se stavěcí deskou, což je nejhorší možný případ pro výstavbu. Všechny kroužky měly délku 6mm, pro další podrobnější analýzu by bylo vhodné zvětšit délku a rozměry zkontrolovat na více místech. Kanály s větším poměrem délky a průměru by nemusely dosahovat stejných výsledků.

Rozřezané vzorky č. 2 byly na foceny optickým mikroskopem pro detailní zobrazení všech kanálů. V druhé části vyhodnocení byly tyto vzorky naskenovány 3D optickým skenerem. Získaná data byla analyzována a byla zjištěna závislost průměru kanálu na uhlu sklonu výstavby. U kanálů s příliš nízkým úhlem byla deformace natolik velká, že nebylo možné naskenovat povrch úplně, proto jsou hodnoty průměru s nízkým úhlem výstavby zkresleny. Vzhledem k tomu že se snižujícím se úhlem klesal i průměr kanálu je možné předpokládat další snižování průměru při nízkých úhlech.

Vzorky č. 3 byli také nafoceny na optickém mikroskopu a dále skenovány. U tohoto typu byl sledován vývin deformací při proměnlivém úhlu sklonu na podélném řezu. Obecně lze pozorovat tvorbu zvýšeného počtu deformací v oblasti mezi 20° až 30° a to u všech kanálů bez rozdílu průměru. Všechny tyto vzorky byly vystavěny bez výrazných deformací převalské části kanálu.

ZÁVĚR

V úvodní části bylo nutné, abychom se hlouběji seznámili s problematikou výroby převislých ploch technologií SLM. Jak bylo zjištěno, touto problematikou se zabývalo několik výzkumných týmu a byla provedena řada testů. Na základě těchto testů je známo, že se snižujícím se sklonem převislé plochy klesá její kvalita. Tento jev je důležité zohlednit při návrhu kanálů pro konformní chlazení. Pro další popsání těchto jevů bylo nutné navrhnout zkušební tělesa s kanály. Navržená tělesa byla vytištěna na 3D tiskárně z materiálu Cu7.2Ni1.8Si1Cr a následně analyzována pomocí optického mikroskopu a optického skeneru. Následnou analýzou bylo zjištěno, že všechny kanály mohou být vytištěny a zároveň byla zabezpečena průchodnost všech kanálů. Bylo potvrzeno, že se snižujícím se úhlem sklonu kanálu, narůstaly deformace, avšak nebyli natolik závažné, že by bylo nutné vyhodnotit kanál jako nevyhovující. Výroba kanálů touto metodou je vyhovující, byť je nutné počítat se zhoršující se kvalitou kanálu s klesajícím úhlem výstavby.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HYNEK, Martin, Eduard MÜLLER a Štěpán HELLER. *VSTŘIKOVACÍ LISY*. Plzeň, 2013, 11 s. Dostupné také z: http://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Vstrikovaci_lisy.pdf. Výukový materiál. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Martin Hynek, Ph.D.
- [2] GROOVER, Mikell. *Foundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. 4th edition. Bethlehem (Pennsylvania): JOHN WILEY & SONS, 2007. ISBN 978-0470-467002. Dostupné také z: <https://futureingscientist.files.wordpress.com/2014/01/fundamentals-of-modern-manufacturing-4th-edition-by-mikell-p-groover.pdf>
- [3] LENFELD, Petr. Vstřikování plastů. In: [Http://www.ksp.tul.cz](http://www.ksp.tul.cz) [online]. Liberec, 2008 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm
- [4] BOBEK, Jiří. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. 1. Svitavy: © Code Creator, 2016 [cit. 2017-02-17]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/Impresum.html>
- [5] MORRIS, Andrew. Typické uspořádání vstřikovacího nástroje. In: *Azom* [online]. Manchester: AZO MATERIALS, 2001 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=265>
- [6] ŽÁK. *Vstřikovací formy* [online]. Brno, 2008 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni_soubory/htn_tvareci_nastroje_vstrikovaci_formy_zak.pdf. Fakulta strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně.
- [7] LABAJ, Lukáš. *Konstrukce vstřikovací formy* [online]. Zlín, 2008 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/5547/labaj_2008_bp.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Štěpán Šanda.
- [8] ZEMAN, Lubomír. Temperace vstřikovacích forem. [Http://www.plasticportal.cz](http://www.plasticportal.cz) [online]. Nitra (Slovensko): PLAST FORM SERVICE, 2015 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://www.plasticportal.cz/cs/temperacia-vstrekovacich-foriem-dolezita-podmienka-vyroby-vystrekov-z-termoplastov-1-cast/c/3085>
- [9] BROOKS, H. a K. BRIGDEN. Design of conformal cooling layers with self-supporting lattices for additively manufactured tooling. *Additive Manufacturing* [online]. 2016, roč. 11, s. 16–22. ISSN 22148604. Získáno z: doi:10.1016/j.addma.2016.03.004
- [10] BLAŽÁK, Jan. *Konstrukční návrh vstřikovací formy pro dvoukomponentní vstřikování* [online]. Zlín, 2012 [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <http://digilib.k.utb.cz/handle/10563/23081>. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Michal Staňek.

- [11] HYNEK, Martin. *TEMPERACE VSTŘIKOVACÍCH FOREM*. Plzeň, 2013, 13 s. Dostupné také z: http://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Temperace_vstrikovacich_forem.pdf
- [12] BĚHÁLEK, Luboš. *TEORIE ZPRACOVÁNÍ NEKOVOVÝCH MATERIÁLŮ: Temperace vstřikovacích forem* [online]. In: . Liberec, 2013, s. 28 [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tzn/8.pdf
- [13] Termomechanika: Základy přenosu tepla. *Energetický ústav Odbor termomechaniky a techniky prostředí* [online]. Brno [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/15_Prenos.pdf
- [14] POKORNÝ, Marek. *Proudění tepla* [online]. Praha, 2006 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/e-text/specialiste/1/1-3_Proudeni_tepla.pdf
- [15] Cooling system. *www.hasco.com* [online]. Austria: HASCO AUSTRIA Ges.m.b.H, 2017 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <https://www.hasco.com/hasco/en/Product-catalogue/Z/Cooling-system/Redirecting-and-seal/c/PIM030802> [<http://www.fado.info/en/offer/conformal-cooling/>]
- [16] Topné patrony. *Www.backer-elektro.cz* [online]. Hlinsko: Backer Elektro CZ, c2002-2014 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <https://www.backer-elektro.cz/produkty/topne-patrony><http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-28/issue-6/features/additive-manufacturing-at-ge-aviation.html>
- [17] Mecobond. *www.mecobond.de* [online]. Mülheim an der Ruhr: MECOBOND [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.mecobond.de/english/index.htm>
- [18] Uddeholm: Moldmax HH. *Www.uddeholm.com* [online]. Hagfors, 2016 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: http://www.uddeholm.com/files/moldmax_hh-english.pdf
- [19] Fado: conformal cooling. *Www.fado.info* [online]. Polsko, c2017 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.fado.info/en/offer/conformal-cooling/case-study-2/>
- [20] Konstrukter. PAGÁČ, Marek. *Www.konstrukter.cz* [online]. Brno: Nová média, 2017 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: [21] [<http://www.konstrukter.cz/2017/01/26/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-3-predvyrobní-etapa-topologická-optimalizace/>]
- [21] Powder bed additive manufacturing systems and its applications. *Www.researchgate.net* [online]. Brasov, 2012 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/275533064_Powder_bed_additive_manufacturing_systems_and_its_applications
- [22] Additive manufacturing at GE Aviation. ROCKSTROH, Todd. *Www.industrial-lasers.com* [online]. Cincinnati [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-28/issue-6/features/additive-manufacturing-at-ge-aviation.html>

- [23] MAZUR, Maciej, Martin LEARY, Matthew MCMILLAN, Joe ELAMBASSERIL a Milan BRANDT. SLM additive manufacture of H13 tool steel with conformal cooling and structural lattices. *Rapid Prototyping Journal* [online]. Bradford: Emerald Group Publishing Limited, 2016, **22**(3), 504-518 [cit. 2017-05-13]. DOI: 10.1108/RPJ-06-2014-0075. ISSN 13552546.
- [24] WANG, Di, Yongqiang YANG, Ziheng YI a Xubin SU. Research on the fabricating quality optimization of the overhanging surface in SLM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. London: Springer-Verlag, 1304, **65**(9), 1471-1484 [cit. 2017-05-13]. DOI: 10.1007/s00170-012-4271-4. ISSN 02683768.
- [25] YANG, Yongqiang, JIAN-BIN LU, Zhi-Yi LUO a WANG. Accuracy and density optimization in directly fabricating customized orthodontic production by selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal* [online]. Emerald Group Publishing Limited, 2012, **18**(6), 482-489 [cit. 2017-05-13]. DOI: 10.1108/13552541211272027. ISSN 13552546.
- [26] CALIGNANO, F. Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting. *Materials and Design* [online]. Elsevier, 1412, **64**, 203-213 [cit. 2017-05-13]. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.07.043. ISSN 02613069.
- [27] KOČICA, Martin. *ZPRACOVÁNÍ SLITIN MĚDI POMOCÍ TECHNOLOGIE SELECTIVE LASER MELTING*. Brno, 2016. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

<i>SLM</i>	Selective laser melting
<i>CAD</i>	computer aided design

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Laboratorní protokol – porovnání geometrie s přesnou předlohou

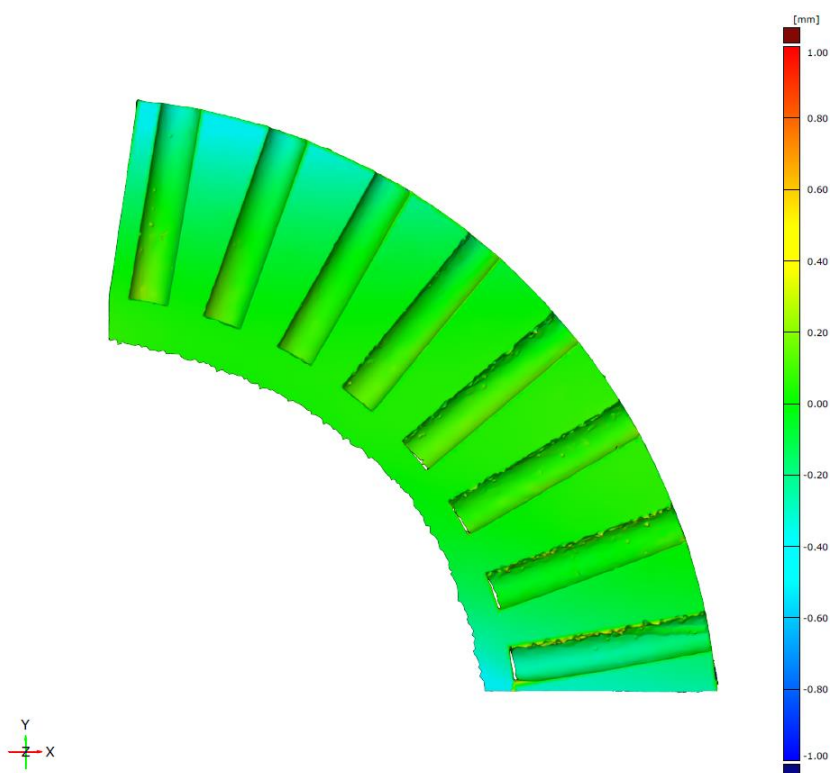
Příloha 2 – Fotodokumentace

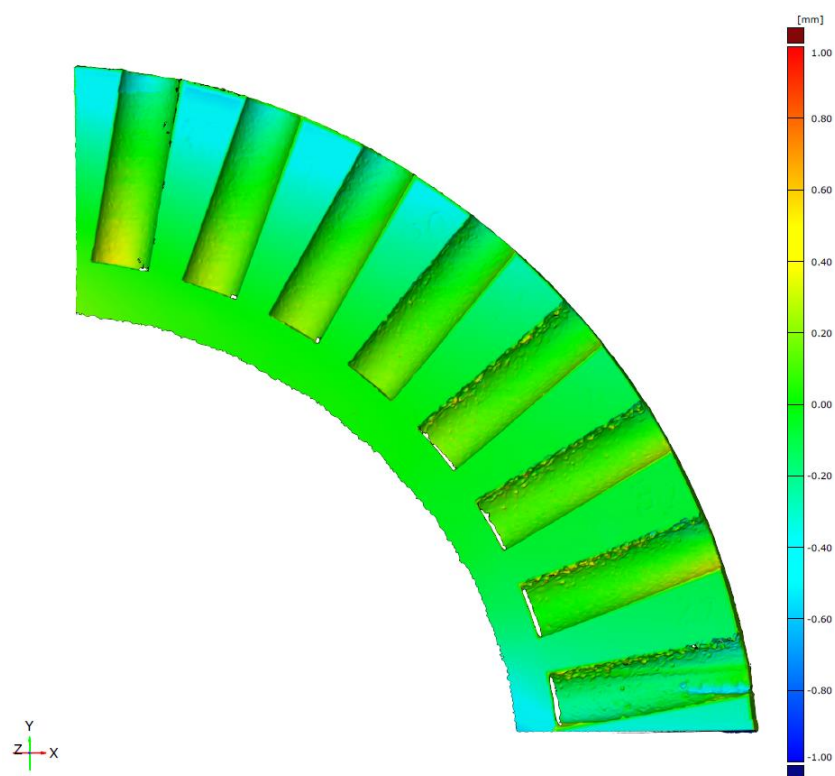
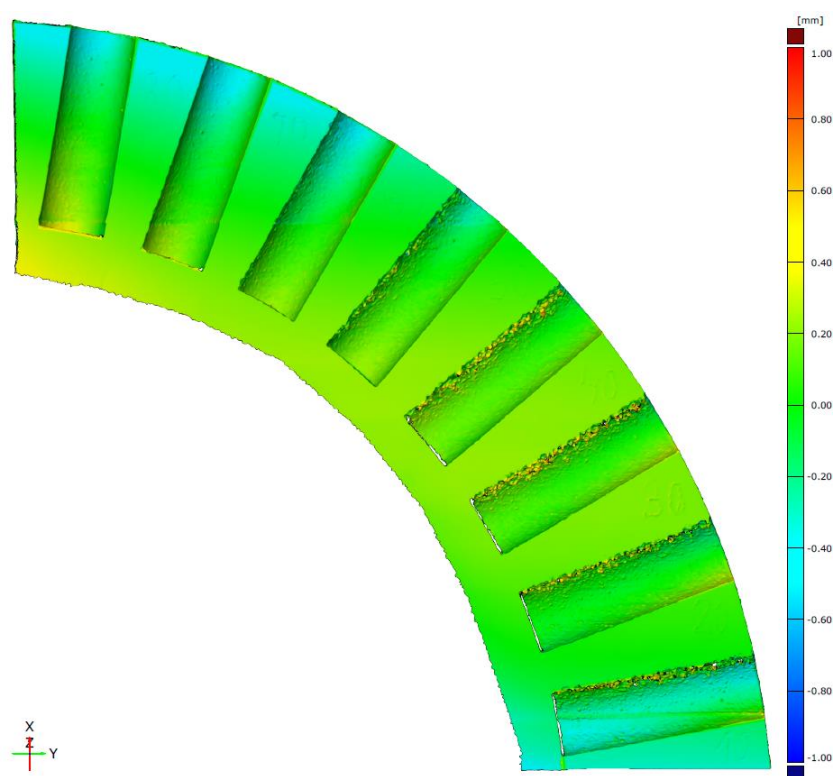
Příloha 3 – CAD modely

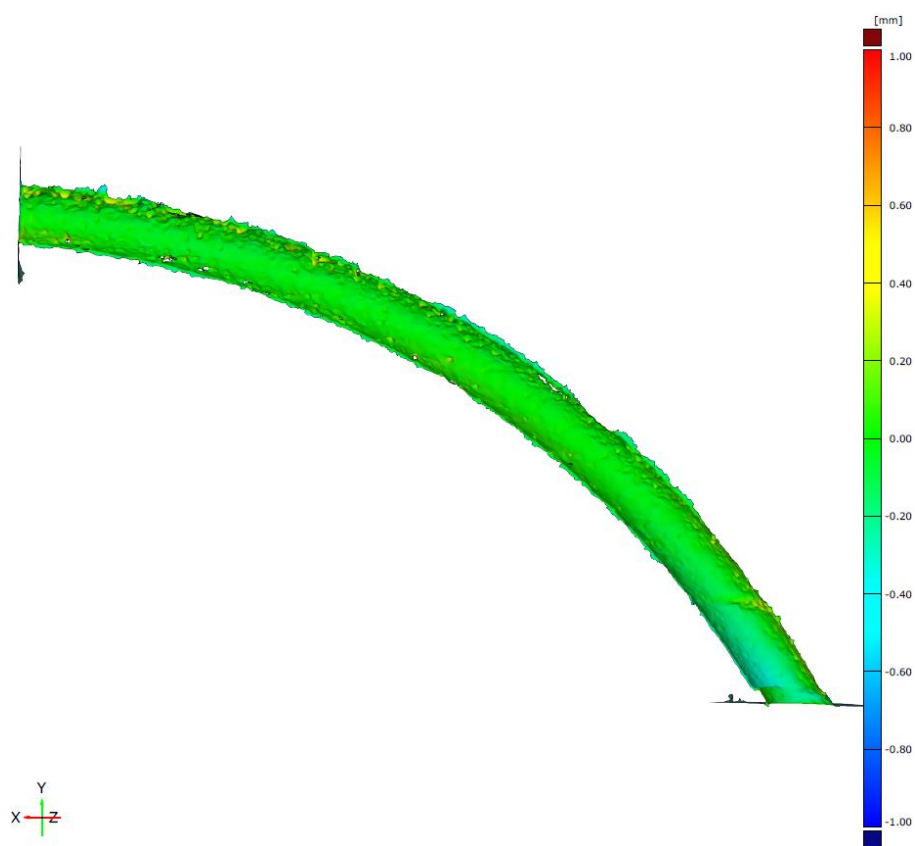
LABORATORNÍ PROTOKOL

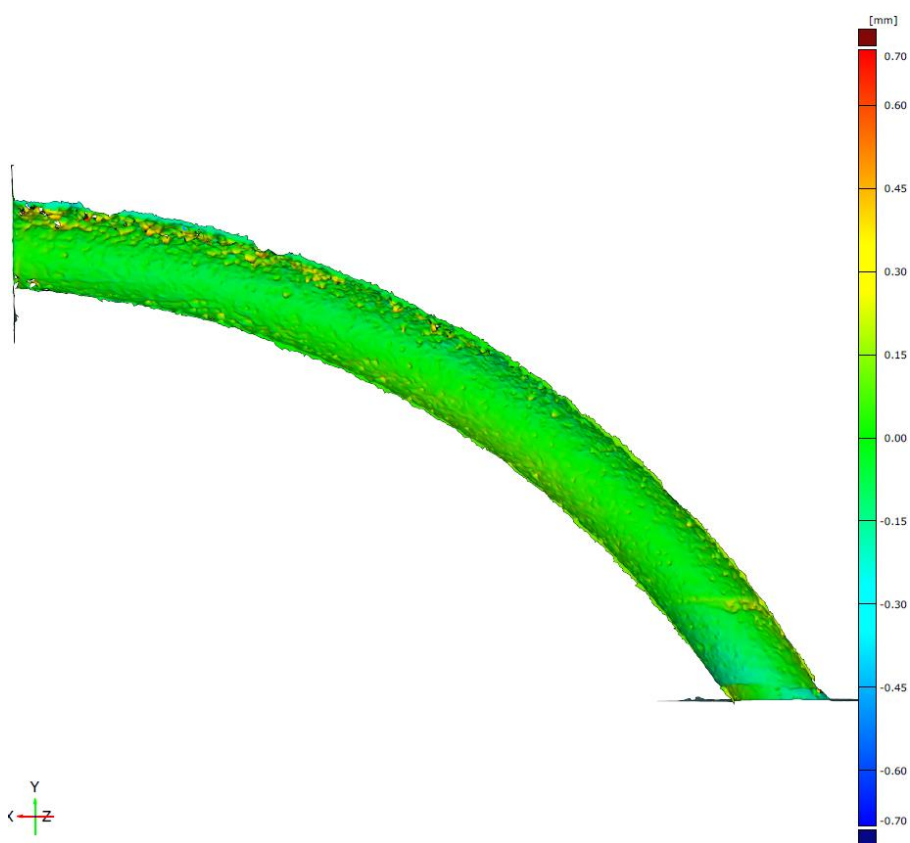
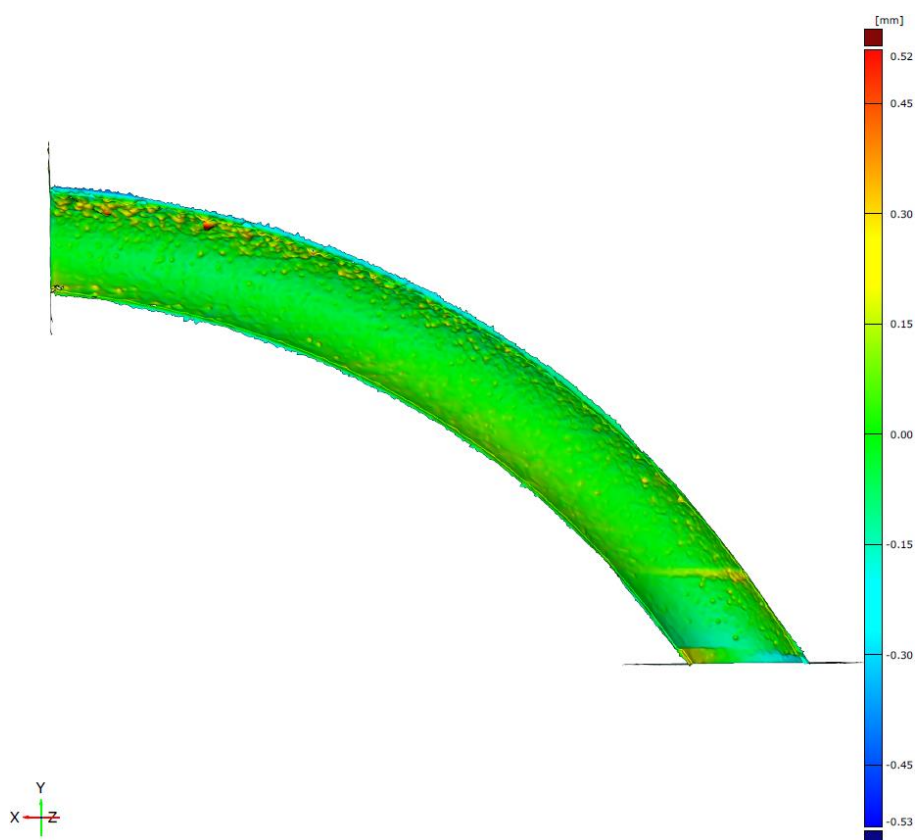
název	Skenování experimentálních vzorků
použité zařízení	ATOS triplescan 8M
datum	17. 5. 2017

EXPERIMENTÁLNÍ TĚLESO Č. 2 - 4MM



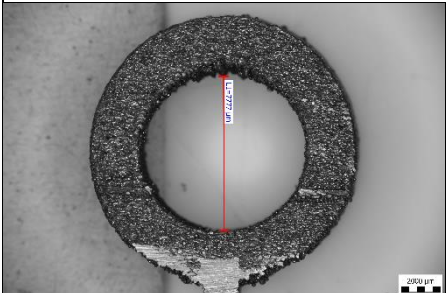
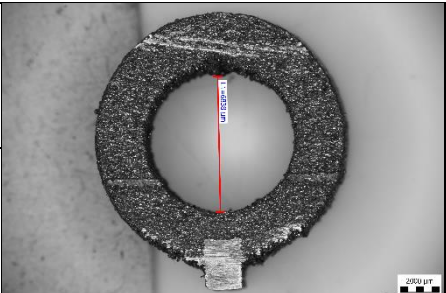
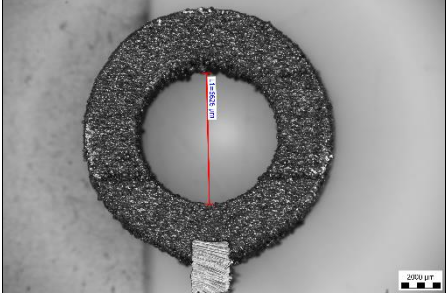
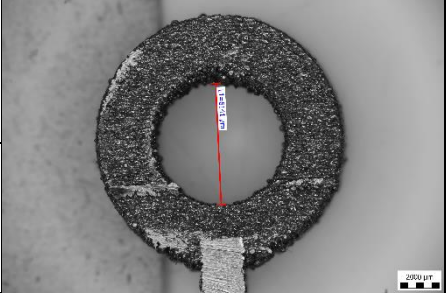
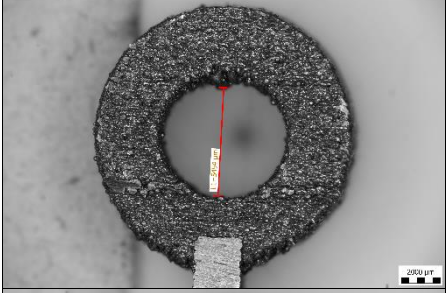
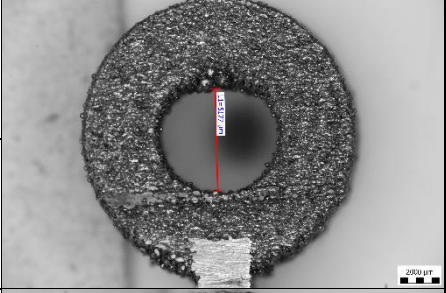
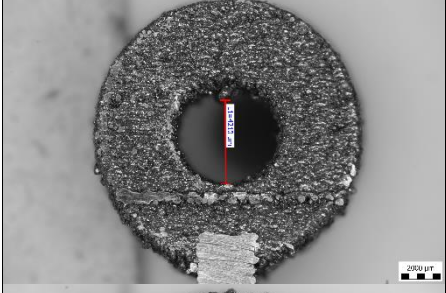
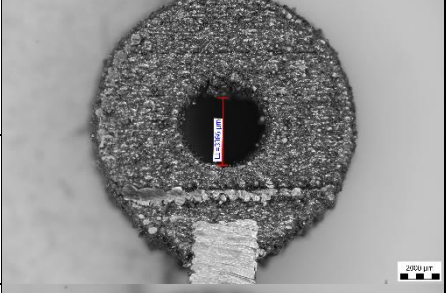
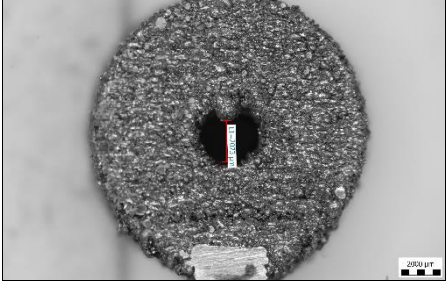
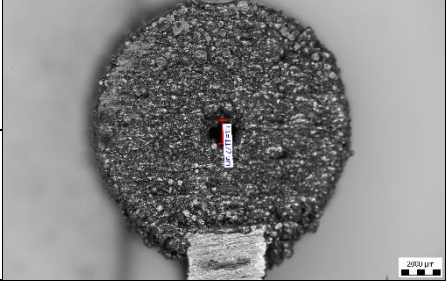
EXPERIMENTÁLNÍ TĚLESO Č. 2 – 6MM**EXPERIMENTÁLNÍ TĚLESO Č. 2 - 8M**

EXPERIMENTÁLNÍ TĚLESO Č. 3 – 4MM

EXPERIMENTÁLNÍ TĚLESO Č. 3 – 6MM**EXPERIMENTÁLNÍ TĚLESO Č. 3 – 8MM**

FOTODOKUMENTACE

SKUTEČNÉ ROZMĚRY EXPERIMENTÁLNÍHO TĚLESA Č. 1

nominální výška [mm]			
skutečná výška [mm]			
	10		9
	7,77		6,84
	8		7
	6,63		6,14
	6		5
	5,45		5,18
	4		3
	4,21		3,39
	2		1
	2,01		1,17

DETAIL ODSUPŇOVANÝCH KANÁLŮ

Odstupňované kanály	10			
	20			
	30			
	40			
	50			
	60			
	70			
	80			
úhel [°]		4mm	6mm	8mm